



Etude de la contribution des systèmes immunitaires artificiels au pilotage de systèmes de production en environnement perturbé

Saber Darmoul

► To cite this version:

Saber Darmoul. Etude de la contribution des systèmes immunitaires artificiels au pilotage de systèmes de production en environnement perturbé. Informatique mobile. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II; Université du 7 Novembre à Carthage, 2010. Français. NNT : 2010CLF22027 . tel-00719298

HAL Id: tel-00719298

<https://theses.hal.science/tel-00719298>

Submitted on 19 Jul 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N. d'ordre : D.U. : 2027

EDSPIC : 482

UNIVERSITE BLAISE PASCAL – CLERMONT II

ECOLE DOCTORALE SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE CLERMONT-FERRAND

Et

UNIVERSITE 7 NOVEMBRE – CARTHAGE

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES ET DE TECHNOLOGIE

THESE EN COTUTELLE

Présentée par

Saber DARMOUL

En vue d'obtenir le grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITE

Spécialité : PRODUCTIQUE (Université Blaise Pascal)

Spécialité : INFORMATIQUE INDUSTRIELLE (Université 7 Novembre Carthage)

ETUDE DE LA CONTRIBUTION DES SYSTÈMES IMMUNITAIRES ARTIFICIELS AU PILOTAGE DE SYSTÈMES DE PRODUCTION EN ENVIRONNEMENT PERTURBÉ

Soutenue publiquement à Clermont Ferrand le 09 / 04 / 2010 devant le jury :

M. Damien TRENTESAUX	Président et rapporteur
M. Samir BEN AHMED	Rapporteur
M. Henri PIERREVAL	Co directeur de thèse
Mme Sonia HAJRI – GABOUJ	Co directrice de thèse
M. Alain QUILLOT	Membre invité

Remerciements

Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre d'une thèse en cotutelle entre l'Université Blaise Pascal – Clermont II, et l'Université 7 Novembre à Carthage. Il s'agit d'un projet de collaboration entre le Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes (LIMOS, UMR CNRS 6158), et l'Unité de Recherche en Automatique et Informatique Industrielle (URAI). Il a été mené en alternance dans les locaux de l'Institut Français de Mécanique Avancée (IFMA) en France, et de l'Institut National des Sciences Appliquées et de Technologie (INSAT) en Tunisie. Il a été financé grâce à une bourse de recherche de l'Agence Universitaire de la Francophonie AUF (www.auf.org). Il n'aurait pas pu aboutir sans le soutien et l'implication des personnes que je remercie ici.

Je remercie Monsieur Alain QUILLOT, Professeur à l'Université Blaise Pascal, Directeur du LIMOS, pour m'avoir accueilli au sein de son institution et de me faire l'honneur d'être membre de mon jury de thèse.

Je remercie Monsieur Damien TRENTESAUX, Professeur à l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, ainsi que Monsieur Samir BEN AHMED, Professeur à la Faculté des Sciences de Tunis, d'avoir bien voulu accepté de rapporter mon mémoire de thèse.

Je remercie Madame Sonia HAJRI GABOUJ, Professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées et de Technologie, et co directrice de mes travaux de recherche, pour son engagement dans ce projet, son aide inconditionnelle, sa patience démesurée et ses encouragements rassurants. Je tiens à vous exprimer, Madame, toute ma reconnaissance et ma gratitude pour l'aboutissement de plus de huit années de travail et de projets (PFE ingénieur, mastère et thèse) sous votre direction clairvoyante.

Je remercie Monsieur Henri PIERREVAL, Professeur à l'Institut Français de Mécanique Avancée, et co directeur de mes travaux de recherche, pour son aide, son support, ses conseils avisés et ses encouragements tout au long de ce projet. Je tiens à vous exprimer, Monsieur, toute ma reconnaissance de ce savoir et de ce savoir faire que vous m'avez transmis avec tant d'humilité, de modestie, de pertinence et d'élégance.

Je remercie toute l'équipe AUF et tout particulièrement Madame Boutheina BOUZIRI pour l'accueil chaleureux qu'elle me réserve à chaque fois que je lui rends visite dans les locaux de l'AUF à Tunis.

Je remercie mes parents, mon frère et mes sœurs, pour leur compréhension, leur attachement, leur soutien et tout le réconfort qu'ils ont pu m'apporter tout au long de ces années de recherche.

Je remercie mes amis et collègues à l'IFMA, particulièrement Sabeur, Mahmoud, Moncef, Wiem, Feiza, Amine, Nebil et Ahlem, pour leur aide et leur support.

Je remercie ma fiancée Jihane pour le regard lumineux et le sourire apaisant qu'elle seule sait me prodiguer pendant les périodes difficiles, et qui me poussent vers l'excellence.

Je remercie Dieu qui, par sa grâce et sa guidance, a permis que ce modeste effort aboutisse et réussisse.

Sommaire

RESUME	11
ABSTRACT	13
INTRODUCTION GENERALE	16
CHAPITRE 1 : PILOTAGE OPERATIONNEL EN ENVIRONNEMENT PERTURBE	21
1.1. Introduction	23
1.2. Systèmes de production	23
1.3. Systèmes de pilotage de la production	25
1.4. Architectures de systèmes de pilotage de la production	26
1.4.1. Architecture centralisée	27
1.4.2. Architecture hiérarchisée	27
1.4.3. Architecture coordonnée	29
1.4.4. Architecture distribuée	31
1.4.5. Architecture distribuée supervisée	36
1.5. Risques, perturbations et pilotage de la production	38
1.5.1. Notion de perturbation	38
1.5.2. Impact des perturbations	40
1.6. Prise en compte des perturbations en pilotage	40
1.6.1. Prise en compte par les systèmes d'information	40
1.6.2. Prise en compte par l'aide à la décision	41
1.7. Conclusion	49
CHAPITRE 2 : IMMUNITE BIOLOGIQUE, IMMUNITE ARTIFICIELLE ET APPLICATION AUX SYSTEMES DE PRODUCTION	52
2.1. Introduction	54
2.2. Système immunitaire biologique	54
2.2.1. Mécanismes biologiques de détection	55
2.2.2. Mécanismes biologiques d'identification et de reconnaissance	56
2.2.3. Réponse immunitaire adaptative	57
2.3. Systèmes immunitaires artificiels	57
2.3.1. Algorithme de sélection négative	59
2.3.2. Algorithme de sélection clonage	60
2.3.3. Algorithme du réseau immunitaire	60
2.4. Applications immunitaires artificielles dédiées aux systèmes de production	62
2.4.1. Détection d'anomalies	62
2.4.2. Diagnostic d'erreurs	63
2.4.3. Planification et ordonnancement	64
2.5. Discussion	68

2.5.1. Synthèse bibliographique	69
2.5.2. Problématique	70
2.6. Conclusion	71
 CHAPITRE 3 : PRINCIPES IMMUNITAIRES POUR LE PILOTAGE DE SYSTEMES DE PRODUCTION	 74
3.1. Introduction	76
3.2. Analogies entre immunité biologique et pilotage de la production	76
3.2.1. Analogies de structure	77
3.2.2. Analogies de mécanismes	79
3.3. Adaptation des analogies au contexte du pilotage	85
3.3.1. Architecture du système	85
3.3.2. Détection et classification des perturbations	85
3.3.3. Identification des conséquences des perturbations	86
3.3.4. Réaction aux perturbations	87
3.3.5. Structuration des connaissances sur les perturbations	88
3.4. Architecture d'un système immunitaire artificiel pour le pilotage	88
3.4.1. Positionnement par rapport aux systèmes d'information	89
3.4.2. Composants du système	92
3.5. Création d'un réseau de cellules à superviser	97
3.6. Détection et identification des perturbations	103
3.6.1. Classification des perturbations	103
3.6.2. Identification des classes de perturbations	106
3.6.3. Détection des perturbations	110
3.7. Identification des conséquences des perturbations	114
3.8. Réponse aux perturbations	117
3.8.1. Activation des cellules B	117
3.8.2. Activation des cellules mémoires	125
3.8.3. Rôle des cellules Th	126
3.9. Conclusion	132
 CHAPITRE 4 : MISE EN ŒUVRE DES PRINCIPES IMMUNITAIRES POUR LE PILOTAGE	 134
4.1. Introduction	136
4.2. Compatibilité entre les principes immunitaires et le paradigme multi agents	137
4.3. Spécification d'un système immunitaire artificiel pour le pilotage basé sur le paradigme multi agents	138
4.3.1. Fonctionnalités du système	138
4.3.2. Identification des agents et de leurs responsabilités	141
4.3.3. Identification des accointances entre agents cellules	143
4.3.4. Spécification des interactions entre agents cellules	147
4.4. Développement de modèles de comportement des agents	153
4.4.1. Modèle de comportement des agents pathogènes	153
4.4.2. Modèle de comportement des agents cellules de l'organisme	154
4.4.3. Modèle de comportement des agents cellules APC	156
4.4.4. Modèle de comportement des agents cellules B	157

4.4.5. Modèle de comportement des agents cellules Th	158
4.5. Ontologies : outil de gestion de communications entre agents et de capitalisation de connaissances.	159
4.6. Ontologie pour la gestion des connaissances sur les perturbations	161
4.6.1. Gestion des spécifications	162
4.6.2. Gestion des mesures hors spécifications	165
4.6.3. Gestion des perturbations	168
4.6.4. Caractérisation des classes de perturbations.....	170
4.6.5. Gestion des cellules artificielles	173
4.6.6. Gestion du danger.....	177
4.6.7. Gestion des actions de pilotage	180
4.7. Conclusion	193
 CHAPITRE 5 : EXEMPLES DE PILOTAGE PAR LES PRINCIPES IMMUNITAIRES	
.....	196
5.1. Introduction.....	198
5.2. Description du système de production	198
5.3. Présentation de la maquette informatique.....	201
5.3.1. Définition des spécifications des activités.....	202
5.3.2. Définition d'un tissu de cellules artificielles	203
5.4. Exemple 1 : défaillance d'approvisionnement	206
5.4.1. Détection de la perturbation	206
5.4.2. Identification des conséquences de la perturbation	208
5.4.3. Activation d'actions de pilotage.....	213
5.4.4. Aide à l'élaboration d'une réaction à la perturbation	220
5.5. Exemple 2 : défaillance d'une ressource de production.....	224
5.5.1. Détection de la perturbation	224
5.5.2. Identification des conséquences de la perturbation	228
5.5.3. Activation d'actions de pilotage.....	231
5.5.4. Aide à l'élaboration d'une réaction à la perturbation	235
5.6. Discussion.....	235
5.7. Conclusion	238
 CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	240
 BIBLIOGRAPHIE	246
 ANNEXES	260

Résumé

Mots clefs : systèmes de production, pilotage, perturbations, système immunitaire biologique, système immunitaire artificiel, système multi agents, ontologie.

La prise en compte et la gestion des perturbations représentent des enjeux majeurs et des défis à relever lors du pilotage de systèmes de production de biens et de services. La problématique de la gestion efficace des perturbations tout en maintenant de bonnes performances du système de production a intéressé plusieurs chercheurs et praticiens des systèmes de production. Leurs efforts ont donné lieu à plusieurs architectures de pilotage et à différentes approches destinées à assurer la prise en compte de perturbations.

Néanmoins, l'étude de ces architectures et de ces approches permet de remarquer que les travaux existants offrent peu de concepts et de mécanismes spécifiquement dédiés à la prise en compte des perturbations. Plus particulièrement, les architectures de pilotage existantes offrent peu de possibilités d'intégration et de distribution de fonctions de gestion de perturbations telles que la détection, l'identification et la réaction aux perturbations. Nous relevons aussi des lacunes au niveau de la proposition de concepts suffisamment génériques pour permettre la gestion d'une variété de types de perturbations, et au niveau de la proposition de concepts permettant de capitaliser les connaissances sur les perturbations, leurs conséquences et leur traitement en vue d'une réutilisation future.

Dans ce contexte, l'immunité biologique apparaît comme un système naturellement capable de réagir et de s'adapter aux menaces biologiques qui guettent l'organisme hôte. Ce système ne cesse de susciter l'intérêt d'une communauté croissante de chercheurs, dont les travaux ont contribué à l'émergence de systèmes immunitaires artificiels (SIA) comme un nouveau paradigme de l'intelligence artificielle. Malgré les nombreuses applications des SIA, l'étude des approches existantes nous permet de constater qu'il n'existe pas de consensus sur un algorithme immunitaire artificiel. En même temps, il existe très peu de travaux sur le pilotage de systèmes de production soumis à des perturbations.

L'étude du fonctionnement de l'immunité biologique nous permet de constater que ce système naturel peut constituer un cadre conceptuel intégré pour la gestion des perturbations dans les systèmes de production. Nous proposons alors de dégager les principes immunitaires qui font le succès de l'immunité biologique dans la défense de l'organisme, et de les adapter au pilotage de systèmes de production soumis à des perturbations.

Pour ce faire, nous proposons des analogies de structure et de mécanismes entre l'immunité biologique et le pilotage de systèmes de production. A partir de ces analogies, nous identifions les principales caractéristiques d'une architecture distribuée de pilotage, basée sur les principes immunitaires. Nous montrons que cette architecture est assez générique, dans le sens où elle permet de prendre en compte une variété de perturbations.

Cette architecture met en œuvre des fonctions de détection, d'identification et de réaction aux perturbations, qui sont des fonctions spécifiquement dédiées à la gestion des perturbations. Cette architecture permet de distribuer ces fonctions sur des composants inspirés de

l'immunité biologique, tout en offrant des mécanismes de coordination entre ces composants et ces fonctions. Enfin, nous montrons que l'immunité biologique offre des concepts permettant de structurer la connaissance sur les perturbations, ainsi que sur les outils et les méthodes permettant d'y réagir.

En vue d'une mise en œuvre informatique de nos propositions, nous adoptons le paradigme des systèmes multi agents comme un cadre conceptuel compatible avec les propositions issues de l'immunité biologique. Nous adoptons une démarche d'ingénierie multi agents pour spécifier un système de pilotage basé sur les principes immunitaires. Nous présentons les agents du système, décrivons leurs responsabilités et leurs interactions, et proposons un modèle de comportement générique pour chaque type d'agent. Nous nous concentrons ensuite sur la structuration et l'organisation des connaissances relatives aux perturbations. Nous proposons un modèle de connaissances basé sur une ontologie et destiné à mémoriser les perturbations, leurs conséquences ainsi que les actions permettant d'y réagir.

Afin d'illustrer le potentiel de généricité de nos propositions et l'exploitation de ce modèle de connaissances, nous développons une maquette informatique en utilisant la plateforme JADE pour implémenter les cellules du système multi agents, et le logiciel Protégé pour implémenter l'ontologie. Ce prototype logiciel nous permet de tester deux exemples de perturbations, respectivement une défaillance d'approvisionnement et une défaillance d'une ressource de production. Pour chaque exemple, nous illustrons les fonctions de détection de la perturbation, d'identification de ses conséquences, d'activation d'actions de pilotage et de réaction à la perturbation et à ses conséquences. Enfin, la conclusion permet de récapituler les apports de cette thèse, de discuter ses limitations et d'indiquer des perspectives de recherche.

Abstract

Key words: production systems, monitoring, disruptions, biological immune system, artificial immune system, multi agent system, ontology.

Production flow disruption management is both a major issue and an important challenge to production systems monitoring and control. Many researchers and practitioners have been interested in designing efficient production monitoring and control systems which are able to handle disruptions while maintaining high system performance. Despite their efforts, the study of existing monitoring architectures and approaches shows that there is still a lack of specific concepts and mechanisms especially dedicated to disruption management.

More particularly, existing applications offer very few possibilities of integration and distribution of disruption handling functions such as disruption detection, identification of disruption consequences on the production system and reaction to both disruptions and consequences. We also notice the lack of concepts which are generic enough to allow considering a variety of different kinds of disruptions. Finally, concepts are still needed which would allow memorizing a disruption, its consequences on the production system and the decisions that were taken to handle it.

In this context, biological immunity appears as a system which has natural abilities to handle numerous threats to its host organism. Many researchers have been interested in the study of this system. Their efforts have led to the emergence of Artificial Immune Systems (AIS) as a new artificial intelligence paradigm. Despite the numerous AIS applications, the study of existing work shows that there is no unanimous AIS approach. Also, there is only very few AIS applications to production systems monitoring and control.

The investigation of the biological immune system reveals that this natural system can represent an integrated framework to manage disruptions in production systems. That is why we intend to find out the mechanisms that make the biological immunity succeed in protecting a host organism, and to adapt them to the field of production systems monitoring and control.

Therefore, we begin by constructing an analogy between biological immunity and production systems monitoring and control. We use this analogy to identify the features of an immune based, distributed monitoring architecture. We show that this architecture involves concepts which are generic enough to allow handling many kinds of production flow disruptions. This architecture also involves disruption management dedicated functions, such as detection of disruptions, identification of disruption consequences, and reaction to disruptions and to their consequences. These functions are distributed among immune inspired components. Finally, biological immunity offers concepts suitable to coordinate between these functions and to organize and structure disruption knowledge.

We show that these proposals are compatible with the multi agent system paradigm. We adopt a multi agent system engineering approach in order to specify an immune based, distributed monitoring system. We describe the system agents and agent interactions. We also describe each agent's behavioural model.

Then, we focus on structuring and organizing the disruption knowledge. This step represents an important contribution of our work. We propose to design an ontology based knowledge model aimed at memorizing a disruption, its consequences on the production system and the decisions that were taken to handle it.

In order to illustrate the genericity of our proposals and the usefulness of the knowledge model, we develop a software prototype using the *Java Agent Development Environment* – JADE – to implement the multi agent system, and the software PROTEGÉ to implement the ontology. This software allows us to test two disruption examples, namely a supply failure and a production resource failure. For each example, we illustrate the detection, identification and reaction to disruption functions. Finally, the conclusion resumes this work contribution, discusses its limitations and opens up with some future work perspectives.

Introduction générale

De nos jours, les systèmes de production sont de plus en plus assujettis à une réalité commerciale sévère en termes de volatilité des marchés, de personnalisation de la demande, de concurrence accrue et enfin d'exigences de qualité, de délais et de coûts du client final. Réduire les coûts et les délais, améliorer le rendement et la qualité des produits, des processus et des prestations sont les thèmes récurrents de la réalité industrielle des temps modernes.

Cette réalité contraste avec un passé pourtant proche. En effet, les systèmes de production étaient conçus et optimisés pour produire en masse une faible variété de produits. Cette conception facilitait l'atteinte d'objectifs, tels que la minimisation des coûts et la maximisation des performances. Par contre, elle mettait moins l'accent sur des thématiques telles que la flexibilité, la réactivité, l'adaptation au changement ou encore la gestion des perturbations. Ces thématiques n'étaient pour le moins pas explicitement considérées. Ceci a donné lieu à des architectures de systèmes de production et à des systèmes de pilotage rigides, difficiles à maintenir et à faire évoluer, et ne pouvant gérer que pauvrement les perturbations [McFarlane et Bussmann, 2000].

En migrant de plus en plus vers une production de petits volumes et de grande diversité, il est devenu évident que les pratiques et les structures organisationnelles, qui ont autrefois fait leurs preuves, sont devenues inappropriées [McFarlane et Bussmann, 2000]. La nécessité de maîtriser les stocks et de raccourcir les délais ont fait apparaître de nouveaux enjeux, et ont créé de nouveaux besoins. Dorénavant, un système de production doit être organisé et piloté d'une manière qui lui permette de s'adapter aux changements et de réagir aux perturbations et aux aléas de son environnement interne et externe.

Comme le soulignent Bossidy et Charan (2003) dans leur best seller, la gestion des perturbations est l'un des grands défis à relever lors du suivi de la réalisation des décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles prises pour piloter un système de production. Des facteurs et des événements tels que les facteurs humains (absentéisme, grèves, ...), les fluctuations de la demande commerciale, les aléas de la chaîne d'approvisionnement et les défaillances imprévisibles des ressources de production, voient leur impact se répercuter sur les objectifs pré assignés, les budgets alloués, l'état de bon fonctionnement désiré et les plannings souvent pré établis. Les perturbations non prises en compte ou mal gérées peuvent entraîner des pertes de marchés, des pertes de moyens et de ressources de production, des ruptures de contrats, et peuvent à terme causer la disparition du système de production. Dès lors, la problématique de la prise en compte et de la gestion des perturbations revêt une grande importance dans le domaine du pilotage des systèmes de production.

Conscients de ces enjeux, à la fois praticiens et théoriciens des systèmes de production n'ont pas épargné d'efforts pour proposer des solutions destinées à mieux prendre en compte et gérer les perturbations.

Dans la pratique industrielle, le concept de « *système d'exécution manufacturière* », ou MES (de l'anglais, « *Manufacturing Execution System* ») a trouvé un large écho. Ce concept a permis de développer des systèmes informatisés destinés à collecter et à mettre à la

disposition des décideurs des informations qui permettent l'optimisation des activités de production depuis le lancement des ordres de fabrication jusqu'aux produits finis [MESA, 1997]. De tels systèmes informatisés assurent des liens entre, d'une part les systèmes d'information de l'entreprise (comprenant les fonctions de gestion de l'entreprise, tels que les systèmes ERP, GMAO, GQAO, APS, etc.), et d'autre part les systèmes de contrôle/commande, assurant le pilotage en temps réel des ateliers de fabrication.

Malheureusement, comme on le verra plus en détail dans le premier chapitre, s'il est vrai que les systèmes MES facilitent le suivi rigoureux et permanent des activités d'un système de production, ces systèmes n'offrent pas de fonction dédiée à la prise en compte et la gestion de perturbations. La prise de décision dans ces systèmes reste souvent du ressort du décideur humain. L'aide à la décision que de tels systèmes peuvent mettre à la disposition des décideurs, particulièrement face à des perturbations, reste très limitée.

Cette exigence a intéressé les théoriciens des systèmes de production. Leurs travaux ont contribué à l'émergence du concept de pilotage réactif. Le but est de fournir une aide à la décision en proposant des approches capables d'assurer une exécution coordonnée et adaptative des opérations, et de réagir aux perturbations tout en satisfaisant les demandes des clients de manière opportune et rentable (Smith *et al.*, 1990).

Ici aussi, comme on le verra plus en détail dans le premier chapitre, ces efforts ont donné lieu à différentes approches de pilotage de systèmes de production en présence de perturbations. Ces approches sont basées sur des systèmes multi agents, des systèmes hétérarchiques, des systèmes bioniques ou encore des systèmes holoniques (Monostori *et al.*, 1998, Pujo *et al.*, 2002b, Shen *et al.*, 2006, Leita, 2008, Lee et Kim, 2008).

Malheureusement, ces approches offrent peu de concepts génériques leur permettant de traiter une grande variété de perturbations. Bien souvent, ces approches prennent en compte certaines perturbations, et sont incapables d'en gérer d'autres. Dans la plupart des cas aussi, les approches proposées traitent les perturbations en considérant seulement des décisions d'affectation/réaffectation de ressources ou d'ordonnancement/ré ordonnancement.

D'un autre côté, la plupart de ces approches n'a pas pour vocation d'offrir des concepts permettant la capitalisation et la réutilisation des connaissances issues du traitement des perturbations. Or on se rend compte qu'au fur et à mesure du fonctionnement d'un système de production, bien souvent les mêmes perturbations reviennent encore et toujours. La capitalisation et l'exploitation de cette connaissance et de cette expertise sur les perturbations peuvent épargner aux décideurs bien des efforts tout en leur fournissant une aide immédiate et précieuse.

Ces dernières années, les chercheurs se sont intéressés à l'immunité biologique en tant que système naturellement doté de mécanismes lui permettant de justifier d'un haut degré de réactivité et d'adaptabilité dans la protection de son hôte contre les agressions. L'immunité biologique offre en effet plusieurs caractéristiques attrayantes, comme la mémoire immunitaire, la prise en compte d'une grande variété de sources d'infection, les aspects décentralisés et distribués de la réaction immunitaire, etc.

Leurs travaux ont contribué à l'émergence de systèmes immunitaires artificiels (SIA) (De Castro *et al.*, 2002) comme un nouveau paradigme de l'intelligence artificielle. Bien que plusieurs applications industrielles (Dasgupta *et al.*, 1999, 2003), à l'ordonnancement

(Darmoul *et al.*, 2006), ou encore à la robotique (Luh *et al.*, 2006) existent, à notre connaissance, il n'y a pas encore eu de travaux qui ont utilisé le paradigme immunitaire pour adresser le pilotage réactif et adaptatif de systèmes de production.

Cette thèse étudie le potentiel de l'immunité biologique à inspirer des mécanismes capables d'assurer une meilleure prise en compte et gestion des perturbations dans le pilotage de systèmes de production. La conception d'un système de pilotage capable de prendre en compte et de réagir aux perturbations est une tâche extrêmement complexe qui nécessite des travaux dans plusieurs directions. L'objectif de cette thèse est de dégager un cadre conceptuel permettant de structurer la réflexion sur les perturbations, leurs conséquences ainsi que les moyens de les prendre en compte.

En se basant sur ce cadre conceptuel, nous déduisons les principaux traits d'une architecture de pilotage de systèmes de production capable de réagir aux perturbations. Nous décrivons les concepts, les mécanismes et les composants de cette architecture. Aussi, nous proposons des concepts favorisant la structuration et la capitalisation des connaissances et de l'expertise issues du traitement des perturbations.

Enfin, nous situons ce système de pilotage par rapport au paysage de systèmes d'information de l'entreprise. Nous identifions, d'une part les interfaces d'un tel système de pilotage avec les différents systèmes MES et ERP, et d'autre part les interactions de ce système avec les décideurs humains.

Pour mener à bien cette étude, nous entreprenons dans le premier chapitre une revue de la littérature concernant le pilotage de systèmes de production, et plus particulièrement les travaux adressant le traitement des perturbations. Ce chapitre positionne notre travail par rapport à l'état de l'art, et détermine les lacunes à combler dans ce domaine.

Ensuite dans le deuxième chapitre, nous présentons l'immunité biologique, les applications artificielles qui en dérivent et plus particulièrement les applications concernant les systèmes de production. Ce chapitre est destiné à identifier les principes biologiques les plus pertinents, et à voir l'usage qui en a été fait dans la littérature scientifique afférente au domaine. Ce chapitre aboutit à la définition de notre problématique.

Dans le troisième chapitre, nous cherchons à adapter les principes immunitaires dégagés dans le chapitre précédent, au contexte du pilotage de systèmes de production. Ceci est réalisé à travers la construction d'analogies de structure et de mécanismes. Cette analogie sert à déterminer les principales contributions que l'immunité peut mettre à la disposition du pilotage de systèmes de production. Le rôle de ce chapitre est donc de cerner le potentiel de l'immunité biologique. Il est destiné à dégager les principes, les concepts et les mécanismes spécifiquement dédiés à la prise en compte des perturbations et dont la mise en œuvre aboutit à une gestion aussi générique que possible d'une variété de perturbations.

Dans le quatrième chapitre, nous nous intéressons à la mise en œuvre informatique des résultats qui découlent de l'étude de l'immunité biologique. Le rôle de ce chapitre est de présenter nos propositions d'une architecture de pilotage et d'un modèle de connaissance pour gérer les perturbations. Nous montrons la compatibilité de nos propositions avec des technologies existantes permettant leur implémentation. Nous spécifions la conception d'un système multi agent capable de supporter nos propositions et nous proposons une manière de structurer les connaissances en utilisant les ontologies..

Enfin, dans le dernier chapitre, nous développons une maquette informatique et nous donnons des exemples pour illustrer le fonctionnement de l'architecture de pilotage proposée, la généricité du cadre conceptuel développé et enfin la capitalisation et la réutilisation des connaissances et de l'expertise issues du traitement des perturbations.

La conclusion permet de synthétiser les apports de ce travail de recherche, les contributions par rapport aux systèmes d'information, d'aide à la décision et au pilotage existants, et donne enfin des perspectives de recherche.

Chapitre 1 : Pilotage opérationnel en environnement perturbé

RÉSUMÉ. Un des rôles les plus délicats du pilotage de systèmes de production consiste à réagir efficacement aux perturbations afin de maintenir les objectifs de performance assignés. La problématique du pilotage de systèmes de production en environnement perturbé a intéressé plusieurs chercheurs et praticiens des systèmes de production. Leurs efforts ont donné lieu à plusieurs architectures de pilotage et à différentes approches de prise en compte des perturbations. L'objectif de ce chapitre est de situer notre travail par rapport à l'état de l'art. Pour ce faire, nous exposons les principales architectures de pilotage des systèmes de production. Nous nous intéressons plus particulièrement aux travaux adressant le pilotage en environnement perturbé. Une étude de quelques approches typiques existantes est menée afin de déterminer leur utilité et leur intérêt, mais aussi leurs lacunes et les points qui restent à combler. Ce chapitre nous permet de conclure que les travaux existants offrent peu de concepts et de mécanismes spécifiquement dédiés à la prise en compte des perturbations. Plus particulièrement, les problématiques de la détection, de l'identification et du traitement des perturbations ont reçu relativement peu d'attention du point de vue des architectures distribuées de pilotage existantes. Nous relevons aussi des lacunes au niveau de la proposition de concepts assez génériques pour permettre la gestion d'une variété de types de perturbations à la fois, et au niveau des concepts permettant de mémoriser les perturbations et leur traitement en vue d'une réutilisation future.

1.1. Introduction

Le pilotage de systèmes de production est une fonction clef, qui est au cœur d'enjeux multiples, variés et bien souvent conflictuels. La performance, la rentabilité, le rendement et peut être même la viabilité d'un système de production peuvent être sérieusement menacées en l'absence d'un système de pilotage approprié [Leitao, 2008].

L'un des défis majeurs posés au pilotage est l'aptitude à faire face aux perturbations. Compte tenu de la complexité des systèmes de production modernes, la performance d'un système de pilotage se retrouve fortement tributaire de son aptitude à s'adapter et à réagir aux perturbations.

Beaucoup de travaux de recherche et de réalisations industrielles se sont intéressés aux problèmes de pilotage de systèmes de production. Tous soulignent la nécessité et l'importance du traitement des perturbations. Dans ce chapitre, nous exposons les principales architectures de pilotage des systèmes de production. Nous nous intéressons plus particulièrement aux travaux considérant le pilotage en environnement perturbé. Une étude de quelques approches typiques existantes est menée afin de déterminer leur intérêt, mais aussi leurs lacunes et les points qui restent à combler.

Aussi, ce chapitre fait référence à de nombreuses notions de base et introduit un ensemble de concepts et de définitions déjà bien connus dans la littérature. Notre objectif n'est pas de détailler ces concepts déjà largement développés dans la littérature, mais uniquement de donner un rapide descriptif des notions associées aux approches étudiées.

Dans un premier temps, nous présentons les principaux concepts des systèmes de production et de leur pilotage. Nous introduisons les différentes architectures existantes et nous décrivons les entités pilotées ainsi que les différents types de décisions qui peuvent être prises.

Ensuite nous abordons la thématique des perturbations. Plus particulièrement, nous nous intéressons à la nature des perturbations auxquelles un système de pilotage est appelé à réagir, leurs origines, leurs conséquences et la nature des risques que les perturbations sont amenées à introduire sur les objectifs et les entités pilotées. Nous nous posons des questions concernant l'existence d'une classification des perturbations et l'existence d'un cadre conceptuel permettant de les modéliser.

Enfin, nous tentons un rapprochement entre les thématiques de pilotage et de gestion des perturbations. Nous faisons le point sur quelques approches de pilotage typiques qui abordent le problème des perturbations. Ceci nous permet d'identifier les points forts, mais surtout les lacunes des approches existantes afin de nous positionner par rapport à elles.

1.2. Systèmes de production

Un système de production met en œuvre un ensemble de processus de transformation qui convertissent des matières premières et/ou des produits semi finis d'entrée en des produits finis de sortie ayant une valeur ajoutée, et ce en utilisant systématiquement des ressources matérielles et humaines [Groover, 1987, Leitao, 2004].

En s'inspirant de l'analyse systémique, de nombreux auteurs décomposent le système de production en trois sous systèmes : le système physique de fabrication, le système de décision et le système d'information, comme l'illustre la **Figure 1.1**.

Le *système physique de fabrication*, aussi appelé système opérant, système opérationnel ou encore système technologique, est constitué des moyens humains, physiques (machines et outils) et techniques (méthodes et procédés de fabrication) mobilisés pour transformer les intrants (matières premières, pièces, composants, etc.) en produits finis. La « transformation » peut être déclinée en termes de fabrication de produits matériels, mais elle peut aussi désigner d'autres domaines tels que l'assemblage, le transport, la maintenance, le magasinage, les services, etc.

Le *système de décision* est constitué des moyens humains et techniques (algorithmes, outils d'aide à la décision, etc.) mobilisés pour adapter l'évolution du système opérant en fonction de son comportement, de l'état de l'environnement et des objectifs fixés, c'est à dire des informations mises à disposition par le système d'information. Les décisions prises sont liées à une multitude de paramètres qui décrivent la complexité de l'organisation du système et de ses relations avec l'environnement. L'ensemble des évènements, aussi bien externes (issus de l'environnement, comme l'évolution des marchés, des fournisseurs, du coût des matières premières, etc.) qu'internes au système de production (indisponibilité de ressources, etc.) sont autant de facteurs qui conditionnent le déroulement du processus de décision.

Le *système d'information* est constitué des moyens humains, physiques (supports de la communication) et techniques (méthodes et outils de gestion de données) mobilisés pour recueillir, gérer et stocker l'ensemble des informations disponibles dans le système de production et dans son environnement. Le système d'information a pour rôle d'assurer la liaison, d'une part entre le système décisionnel et le système physique, et d'autre part entre le système décisionnel et l'environnement du système industriel. Il doit constamment rendre compte de l'état du système physique et assurer que le système de décision soit informé en temps réel des changements du système physique. Il rend compte de l'apparition d'évènements caractéristiques, transmet les décisions prises et fait état des facteurs externes qui conditionnent leur élaboration.

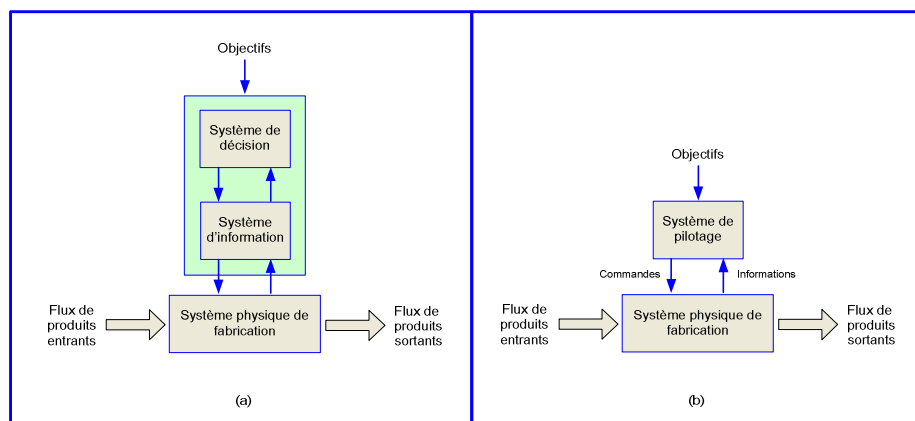


Figure 1.1: Décomposition systémique:
(a) Système entreprise (b) Système de production [Le Moigne, 1990]

L'ensemble du système de décision et du système d'information constitue le *système de pilotage* de la production.

1.3. Systèmes de pilotage de la production

Le pilotage d'une organisation désigne l'ensemble des activités accomplies par l'entité décisionnelle dirigeant cette organisation et permettant d'assurer la cohérence de son fonctionnement [Pujo *et al.*, 2002a].

On peut distinguer différents horizons de prise de décision. Les décisions de pilotage à long terme concernent le niveau stratégique et débouchent sur des orientations durables d'une organisation. Les décisions à moyen terme se rapportent à un niveau tactique. Elles englobent les décisions qui reflètent les objectifs de l'entreprise et les décisions de calcul des charges et de préparation du travail. A court terme, voire en temps réel, la décision devient opérationnelle et met en application le plan d'actions construit par le niveau tactique (moyen terme).

Selon l'APICS¹ [Melnik *et al.*, 1987], le pilotage de systèmes de production comprend un niveau de gestion prévisionnelle et un niveau de gestion de l'exécution des activités, comme l'illustre la Figure 1.2.

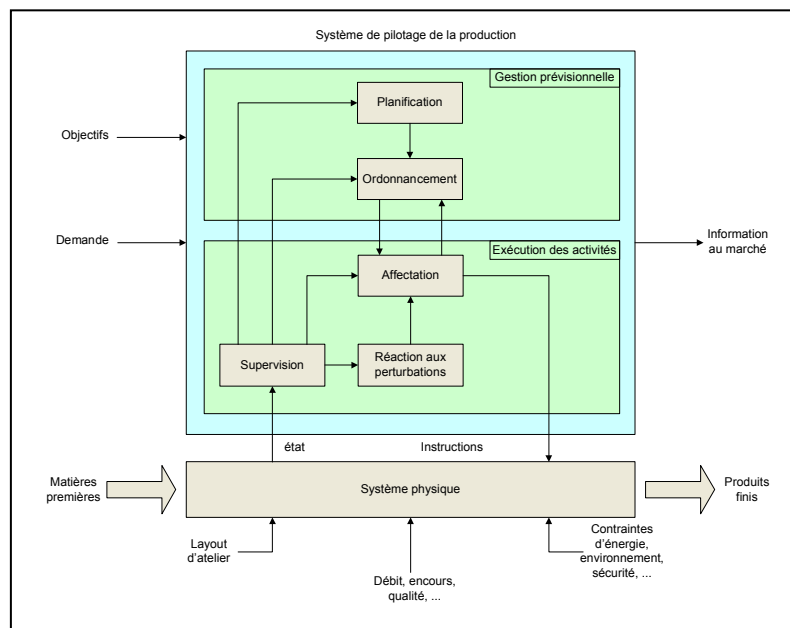


Figure 1.2: Modèle d'un système de pilotage de la production.
Adapté de [MESA, 1995, Colombo, 1998].

La gestion prévisionnelle réalise la coordination entre les différentes activités et ressources de production dans le but de produire les articles désirés. Ce niveau implique la prise de décisions hors ligne, c'est-à-dire avant lancement et exécution. Ce niveau comprend les fonctions de planification et d'ordonnancement.

Les décisions prises par la planification fixent la nature des articles à produire, en quelles quantités, quelles sont les échéances de production, quand et comment utiliser ou libérer les ressources, quels ordres de fabrication lancer dans les ateliers, quand les lancer, et quelles gammes opératoires utiliser. A ce niveau, il s'agit d'établir un planning prévisionnel détaillé

¹ APICS : American Production and Inventory Control Society

de la production en fonction des produits, marchés, procédés, moyens, ressources, charges, etc.

L'ordonnancement concerne l'affectation des opérations aux ressources sur un horizon temporel défini par la planification. L'ordonnancement doit optimiser des critères, tels que les encours, les retards ou les temps de changement d'outillages, et respecter des contraintes, qui reflètent les relations de précédence entre les opérations et les limitations de capacités des ressources.

La gestion de l'exécution des activités, par contre, concerne les décisions prises en ligne, c'est-à-dire après le lancement et pendant la réalisation des activités [Pujo *et al.*, 2002a]. Ce pilotage, souvent qualifié de pilotage d'atelier [Leitao, 2004], a en charge de mettre en oeuvre le programme prévisionnel tout en réagissant aux perturbations. Il comprend les fonctions d'affectation, de supervision et de réaction aux perturbations.

La fonction d'affectation décide de l'utilisation d'une ressource dès que cette dernière devient disponible, et ce en tenant compte de l'état des encours et de l'état actualisé du système de production [Bauer *et al.*, 1991]. Cette fonction peut être réalisée par des règles de priorité qui déterminent quelle opération est exécutée sur une ressource qui se libère. Ces règles peuvent être basées sur les dates d'échéance, la priorité des opérations ou des clients, les temps de traitement, etc.

La fonction de supervision rend compte aux fonctions d'affectation, d'ordonnancement et de planification de la progression de la réalisation des programmes prévisionnels. Aussi, la fonction de supervision détecte les déviations auxquelles l'exécution des programmes prévisionnels est assujettie.

Dans le cas de l'occurrence de déviations ou d'erreurs, il est nécessaire d'effectuer un diagnostic pour identifier les causes de ces perturbations. Le traitement des perturbations durant l'exécution des programmes prévisionnels représente un défi pour le pilotage de la production.

1.4. Architectures de systèmes de pilotage de la production

Divers travaux de recherche se sont intéressés aux architectures de systèmes de pilotage et ont analysé leur évolution, leurs avantages et leurs inconvénients. Parmi ces travaux, nous pouvons citer ceux de Duffie et Piper (1987), Lin et Solberg (1991), Diltis *et al.* (1991), Pels *et al.* (1997), et enfin Kim (2002).

Certes, il est difficile d'établir une classification exhaustive de toutes les architectures de pilotage des systèmes de production publiées dans la littérature. Cependant, nous adoptons dans ce qui suit, la classification de Pujo *et al.* (2002a) pour présenter les architectures de pilotage les plus connues. Cette classification distingue les structures centralisée, hiérarchisée, coordonnée, distribuée et distribuée supervisée.

1.4.1. Architecture centralisée

Dans une architecture centralisée, comme celle illustrée [Figure 1.3](#), toutes les ressources pilotées sont dirigées par un même centre de décision. Ce centre supervise la production, gère en temps réel les évènements qui surviennent et réalise la synchronisation et la coordination de toutes les tâches.

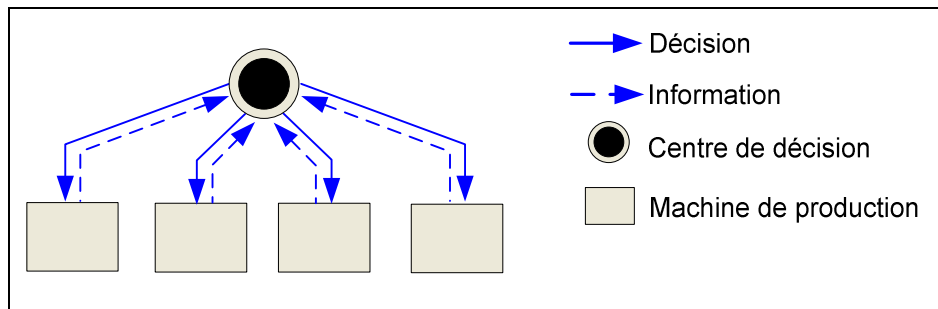


Figure 1.3 : Structure centralisée [\[Pujo et al., 2002a\]](#).

Un nombre limité de chercheurs a proposé des architectures centralisées [\[Titly, 1979 ; Achatz et Parrish, 1987 ; Hammer, 1987 ; Diltis et al., 1991\]](#). Ce type d'architectures bénéficie de l'avantage d'une meilleure gestion et optimisation du pilotage.

Cependant, il présente quelques inconvénients importants tels qu'un temps de réponse long, une grande vulnérabilité aux pannes, une non modularité qui empêche de maintenir correctement le système et une certaine rigidité qui réduit les capacités de régulation du système. Ainsi, la structure centralisée est par essence peu robuste et ne peut donc efficacement intégrer la résistance aux perturbations [\[Pujo et al., 2002a\]](#).

Pour pallier aux inconvénients de cette architecture, l'architecture hiérarchisée a été proposée.

1.4.2. Architecture hiérarchisée

Dans une architecture hiérarchisée, comme celle illustrée [Figure 1.4](#), le système de décision est décomposé en sous systèmes. La résolution du problème global est alors ramenée à une résolution successive de sous problèmes, de dimension et de complexité acceptables [\[Pujo et al., 2002a\]](#).

Cette architecture est caractérisée par l'existence de plusieurs niveaux de pilotage. Chaque niveau a des relations de dépendance vis-à-vis du niveau supérieur et de dominance vis-à-vis du niveau inférieur. Chaque décision est élaborée au niveau où un problème est détecté. Les niveaux inférieurs traitent cette décision comme une contrainte et transmettent en retour une information de suivi au niveau supérieur. Le principal avantage de cette architecture réside dans sa robustesse et sa prévisibilité.

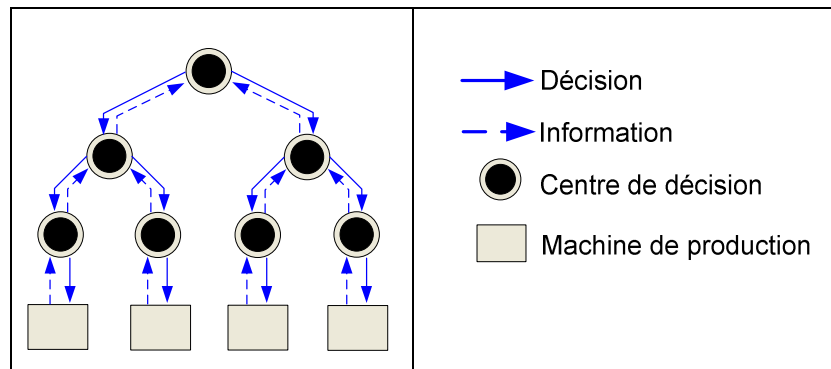


Figure 1.4 : Structure hiérarchisée [Pujo *et al.*, 2002a].

Parmi les reproches faits à l'architecture hiérarchisée, certaines réserves peuvent être formulées notamment en termes de réaction aux perturbations, de maintenance du système de décision et d'accessibilité au système d'information.

En effet, des auteurs, tels que Brussel *et al.* (1998), reportent la difficulté d'ajouter, de modifier ou de supprimer des ressources. D'autres, tels que Diltis *et al.* (1991), notent la difficulté de mettre à jour la conception de la structure. Enfin, des auteurs, tels que Duffie et Prabhu (1994) ou Krothapalli et Deshmukh (1999), soulignent que la panne du contrôleur central de haut niveau exige l'arrêt total du système et que toute perturbation imprévue, comme la panne d'une ressource, rend la planification et l'ordonnancement pour le contrôleur de niveau supérieur invalide.

Plusieurs travaux ont proposé des architectures de pilotage hiérarchisé, parmi lesquelles nous pouvons citer l'architecture AMFR [Jones et Maclean, 1986 ; Jackson et Jones, 1987], MADEMA [Chryssolouris *et al.*, 1984, 1988], PAC [Bauer *et al.*, 1991], RapidCIM [Joshi *et al.*, 1995], et FACE [Onori, 1996]. Dans la suite, nous présentons succinctement ces travaux.

L'architecture AMFR (« *Automated Manufacturing Research Facility* ») a été introduite par Jones, Maclean et Jackson [Jones et Maclean, 1986 ; Jackson et Jones, 1987]. Il s'agit d'un modèle de contrôle hiérarchique pour les systèmes manufacturiers automatisés. Le modèle intègre cinq modules : usine (« *facility* »), atelier (« *shop* »), cellule (« *cell* »), poste de travail (« *workstation* ») et équipement (« *equipment* »). Chaque module décompose la commande d'entrée provenant d'un superviseur en des sous tâches simples, les assigne aux modules subordonnés appropriés, gère leurs exécutions et fournit enfin un compte rendu au superviseur. Aucune communication directe entre les modules de même niveau n'existe.

L'architecture MADEMA (« *Manufacturing Decision Making* ») a été introduite par le MIT² dans le but de développer des modèles de prise de décision au niveau des cellules de production [Chryssolouris *et al.*, 1984, 1988]. Ce modèle comporte quatre niveaux hiérarchiques : l'usine (« *factory* »), l'atelier (« *job-shop* »), le poste de travail (« *work center* ») et les ressources (« *resource* »). Le premier niveau représente l'usine toute entière et contrôle la capacité d'entrée des demandes dans l'usine. Le niveau atelier assigne les tâches aux différents postes de travail. Le niveau poste de travail représente un groupement de ressources de production. Le dernier niveau se rapporte aux ressources unitaires de production. MADEMA comporte un module de simulation, un module de prise de décision et une base de données. Le module de simulation simule la production sous différents types de scénarios et d'organisations de cellules. Le module de décision détermine les alternatives

² MIT : *Massachusetts Institute of Technology*

disponibles, analyse les conséquences et sélectionne la meilleure alternative. Cette approche peut tester, en mode off line, la réaction d'un système de production suite à une prise de décision. L'inconvénient est que cette prise de décision ne peut être faite en ligne.

Les deux architectures AMFR et MADEMA ont été comparées dans [Boulet *et al.*, 1991]. Les auteurs concluent que le modèle AMFR est plus flexible. Par contre, le modèle MADEMA permet de meilleures implémentations pratiques dans l'industrie. Les deux modèles manquent toutefois de réactivité et de bonnes performances en temps réel face aux événements imprévus.

Le projet européen COSIMA (ESPRIT 477) a donné lieu à une architecture logicielle fonctionnelle pour les niveaux cellule et atelier [Bauer *et al.*, 1991]. Cette architecture met en œuvre cinq modules fonctionnels constituant le modèle PAC (« *Production Activity Control* ») permettant d'intégrer le niveau de prise de décision en temps réel. Ces cinq modules sont l'ordonnanceur, le répartiteur, le superviseur, le(s) transporteur(s) et le(s) producteur(s), comme l'illustre la Figure 1.5.

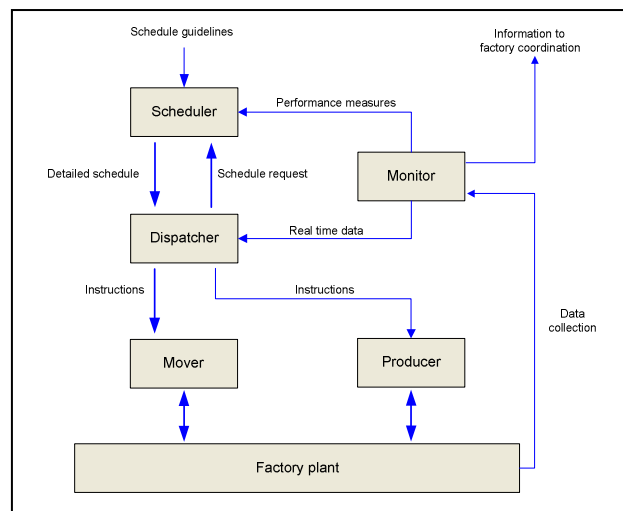


Figure 1.5 : architecture PAC [Bauer *et al.*, 1991].

L'ordonnanceur (« *scheduler* ») ordonnance la production à partir des informations transmises par le niveau tactique (décisions à moyen terme). Le répartiteur (« *dispatcher* ») coordonne les postes de travail et prépare les phases à réaliser en contrôlant notamment la disponibilité des matières aux postes concernés. Le superviseur (« *monitor* ») collecte en temps réel des données issues du système physique et les traduit pour qu'elles soient utilisables par des activités de prise de décision. Le(s) transporteur(s) (« *mover* ») coordonne(nt) le déplacement des matières et des composants entre les différents postes de travail. Le(s) producteur(s) (« *producer* ») assure(nt) le lancement puis le contrôle de la fabrication. La coordination entre systèmes PAC est assurée par un module de coordination FC (« *Factory Coordination* »).

RapidCIM est une architecture hiérarchique destinée à faciliter et à accélérer le processus de développement de logiciels de pilotage de cellules flexibles [Joshi *et al.*, 1995]. Cette architecture inclut une hiérarchie à trois niveaux, comme illustré Figure 1.6. Le niveau équipements renferme les ressources physiques (machines à contrôle numérique, robots, AGV, ...). Le niveau poste de travail (« *workstation* ») renferme des pièces d'équipement intégrées et des robots desservant un ou plusieurs machines. Le niveau atelier (« *shop* »)

renferme plusieurs postes de travail intégrés desservis par un système de transport. Cette architecture offre des fonctions de planification, d'ordonnancement et de suivi d'exécution.

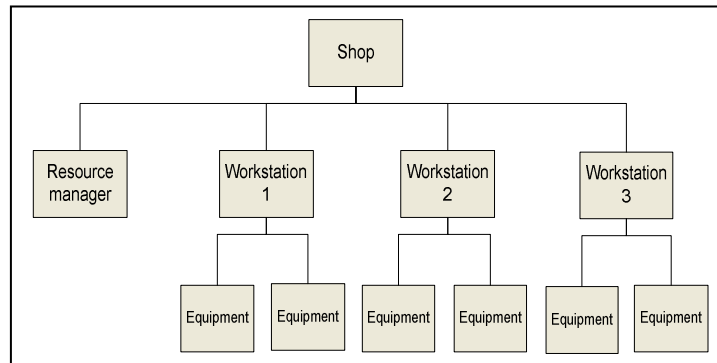


Figure 1.6 : Architecture hiérarchique RapidCIM.

Le *Royal Institute of Technology* suédois a développé l'architecture FACE (« *Flexible Assembly Control Environment* ») pour accélérer et simplifier les tâches de programmation et de contrôle des cellules d'assemblage automatiques flexibles [Onori, 1996]. Cette architecture repose sur un module de contrôle off line, un module de contrôle on line, un module de gestion d'erreur et des bases de données. Le module de contrôle off line gère les programmes de génération de trajectoires pour les robots de la cellule d'assemblage. Le module de contrôle on line est responsable de la gestion et du contrôle du système et comprend un module de démarrage, un module de planification des ordres et un module d'affectation. Le module de gestion d'erreur intervient lorsqu'une panne est détectée dans la cellule d'assemblage. Ce module applique une combinaison de techniques de récupération active et de réordonnancement.

1.4.3. Architecture coordonnée

Une architecture coordonnée, telle que celle illustrée Figure 1.7, est une architecture hiérarchique modifiée (« *modified hierarchical control* ») qui permet la communication et la coordination entre les entités d'un même niveau hiérarchique. Cela a le mérite d'accroître la capacité de décision locale au sein de chaque niveau, et favorise ainsi la réactivité par une meilleure intégration en temps réel des perturbations [Pujo et al., 2002a].

Le pilotage coordonné a été mis en œuvre par des approches telles que MSI (« *Manufacturing Systems Integration* ») [Senehi et al., 1994], FACT (« *Factory Activity Control* ») [Arentsen, 1995], PAC++ (« *Production Activity Control* ») [Andersson, 1997], CIM [Quintas et Leita, 1997], MOSCOT (« *Modular Shop Control Toolkit* ») [Teunis et al., 1998] et CHAMP (« *Chalmers Architecture and Methodology for Flexible Production* ») [Gullander, 1999]. Ces travaux sont succinctement présentés ci après.

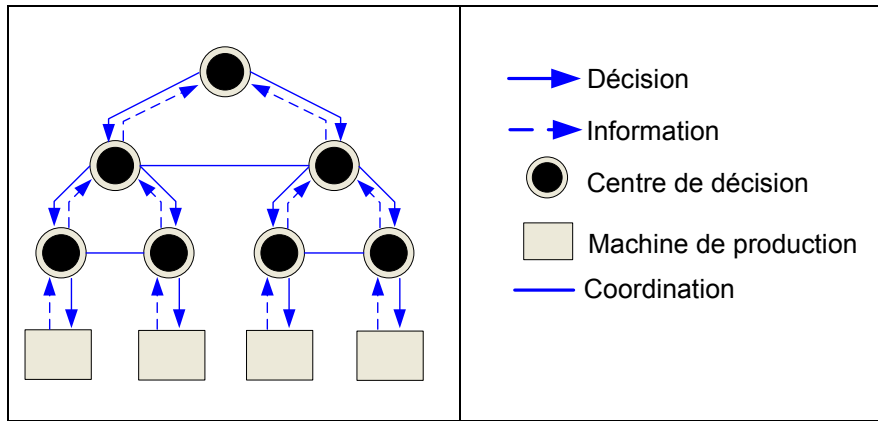


Figure 1.7 : Structure coordonnée [Pujo *et al.*, 2002a].

L'architecture FACT (« *Factory Activity Control Model* ») introduit un concept générique de pilotage d'atelier [Arentsen, 1995]. L'architecture renferme six modules de base, distribués sur deux niveaux hiérarchiques. Le niveau de la cellule de production renferme les modules d'ordonnancement (« *scheduling* »), d'affectation (« *dispatching* »), de supervision (« *monitoring* ») et de diagnostic (« *diagnosis* »). Le niveau de la station de travail renferme les modules principal et auxiliaire de contrôle du poste de travail. Ces modules concernent les fonctions de planification, de contrôle et de supervision nécessaires à une exécution efficace des plans de production.

L'architecture CHAMP (« *Chalmers Architecture and Methodology for Flexible Production* ») est destinée au pilotage d'une cellule de production. Cette architecture est le fruit des expériences acquises de l'implémentation de systèmes de pilotage basés sur l'architecture PAC et ses extensions PAC+ et PAC++ [Andersson, 1997]. L'architecture CHAMP inclut des fonctions pour l'ordonnancement, l'affectation, le contrôle de ressources, de supervision et de gestion d'erreurs [Gullander, 1999]. Les principales caractéristiques de cette architecture est la séparation entre les informations produit et les informations ressource, et la séparation entre fonctions génériques et fonctions spécifiques relatives aux produits et ressources en cours d'utilisation. L'architecture introduit aussi une structure générique de gestion de messages.

L'architecture CIM, illustrée Figure 1.8, a été développée pour piloter une cellule flexible [Quintas et Leita, 1997]. Cette architecture met en œuvre un ensemble de modules structurés autour du module « *Manager Controller* » qui est responsable du contrôle et de la supervision de la cellule. A chaque ressource physique est associé un module appelé « *Device Controller* » qui est en charge du contrôle local de la ressource et de l'exécution des tâches requises par le module de niveau supérieur.

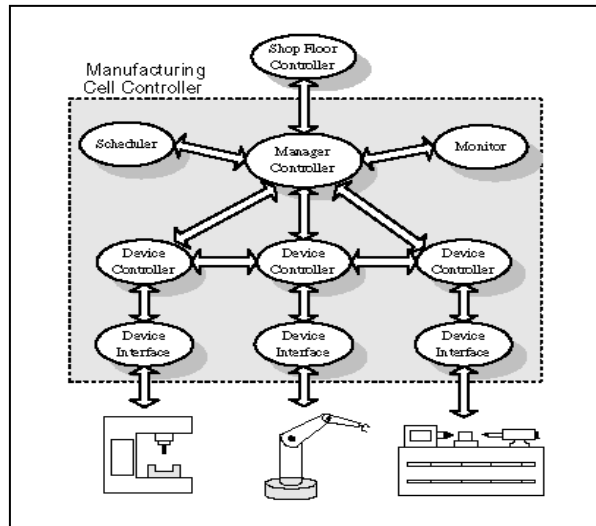


Figure 1.8 : Architecture CIM [Leitao, 2004].

1.4.4. Architecture distribuée

L'avènement de l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) a joué un rôle important dans la distribution des systèmes de pilotage [Parunak, 1996]. Plusieurs travaux de recherche ont délaissé les architectures centralisées et hiérarchisées pour essayer de mettre en œuvre des architectures distribuées. Dans ces architectures, le pilotage est partagé entre plusieurs centres de décision dotés chacun de capacités d'autonomie et de coopération et qui communiquent entre eux afin de mener à bien la production planifiée [Pujo *et al.*, 2002a]. L'architecture distribuée, aussi appelée architecture décentralisée ou hétérarchisée, schématisée Figure 1.9, est fondée sur une distribution de la décision sur un ensemble de centres de décision pilotant chacun un centre de production ou de coordination.

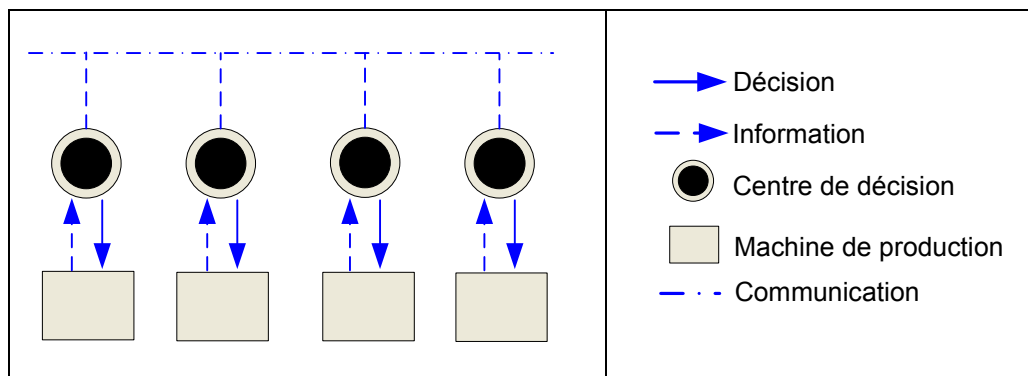


Figure 1.9 : Structure décentralisée [Pujo *et al.*, 2002a].

L'objet de la distribution peut être le problème lui-même (décomposition en niveaux d'abstraction du problème) ou le système réel modélisé (l'atelier de production). Il convient ensuite de définir les unités de résolution auxquelles vont être alloués les sous problèmes identifiés (agents artificiels et/ou humains), déterminer leur degré de liberté d'action et de décision (agent dirigé ou autonome) ainsi que leur organisation sociale (hiérarchique, hétérarchique, ...). Enfin, il reste à préciser leurs modes et protocoles d'interaction (mode de communication, coordination, coopération, ...).

Dans la [Figure 1.9](#), tous les centres de décision sont au même niveau fonctionnel, il n'existe pas de centre de décision de niveau hiérarchique supérieur pour coordonner l'ensemble. Les centres de décision doivent alors s'auto organiser pour assurer des tâches globalement cohérentes [[Pujo et al., 2002a](#)].

Cette architecture bénéficie de l'avantage d'une grande autonomie et coopération. Ces caractéristiques permettent une grande performance contre les perturbations et rendent le système facilement extensible. Par contre, l'optimisation globale est réduite parce que la prise de décision est locale et autonome, sans vue globale sur le système.

Différents types de pilotage, tels que le pilotage par les systèmes multi agents, le pilotage holonique et le pilotage par le produit, se basent sur la structure distribuée. Ces concepts sont brièvement décrits dans les sections suivantes.

1.4.4.1. Pilotage par les systèmes multi agents

De nombreuses applications du pilotage distribué ont été mises en œuvre à l'aide de structures basées sur le concept de systèmes multi agents (SMA) [[Shen et al., 2006](#) ; [Lee et Kim, 2008](#)].

Il n'existe pas de définition unique et consensuelle pour un agent ou un système multi agents [[Leitao, 2008](#)]. Néanmoins, un agent pourrait être défini comme « *un système logiciel qui communique et coopère avec d'autres systèmes logiciels pour résoudre un problème complexe dont la résolution dépasse la capacité individuelle de chacun des systèmes logiciels pris à part* » [[Shen et al., 2006](#)].

Un agent autonome devrait être capable d'agir sans intervention (humaine ou logicielle) extérieure directe, et devrait avoir le contrôle sur ses actions et ses états internes. Un système à base d'agents réfère à « *un système dans lequel l'abstraction clef utilisée est celle d'agent* » [[Shen et al., 2006](#)].

Les travaux adressant le pilotage par les systèmes multi agents ont apporté des contributions au niveau de la conception de protocoles d'interaction entre les agents et au niveau du développement de l'architecture de pilotage. Nous donnons une brève description de ces contributions dans les sections suivantes.

1.4.4.1.1. Protocoles d'interaction entre agents

Les protocoles d'interaction définissent les mécanismes de coordination et/ou de négociation qui peuvent exister entre les agents [[Shen et al., 2006](#)].

Parmi les mécanismes de coordination décrits pour les systèmes multi agents, particulièrement cinq sont fondamentaux : l'ajustement mutuel, la supervision directe, la coordination par standardisation, la coordination par médiation et la coordination par réaction ou comportement réactif. Une description détaillée de ces mécanismes peut être trouvée dans [[Shen et al., 2001](#)].

Dans la plupart des systèmes de pilotage à base d'agents, la négociation est utilisée pour assurer l'allocation de ressources. [Shen et al. \(2006\)](#) recensent un certain nombre de protocoles de négociation, parmi lesquels le mécanisme de vote, le réseau contractuel

(« *Contract Net* ») et ses versions modifiées, les protocoles basés sur des principes d'enchères de marché (« *Market based negotiation protocols* »), et les protocoles basés sur la théorie des jeux.

1.4.4.1.2. Architectures de pilotage par les systèmes multi agents

Selon Shen *et al.* (2006), les travaux sur les architectures de pilotage par les systèmes multi agents considèrent deux niveaux :

- Un niveau matériel proche des ressources et des processus de production.
- Un niveau supérieur qui assure la coordination entre les ressources et les processus de production pour produire les types et les quantités de produits désirés.

Dans la majorité des approches à base d'agents adressant le niveau matériel, un agent est associé à chaque ressource de production, telles que les machines, les matériels de transport (AGV), les robots, les cellules, etc. Ces agents négocient entre eux, éventuellement à travers des agents de médiation ou de coordination, en utilisant des protocoles d'interaction mis en œuvre par l'échange de messages.

S'agissant du niveau supérieur de pilotage d'atelier, Shaw (1988), Duffie et Piper (1986), ainsi que Parunak (1987) comptent parmi les premiers à avoir introduit la structure hétérarchique, utilisant des agents pour représenter des ressources physiques, des produits et des opérateurs humains et mettant en œuvre des techniques d'ordonnancement.

Shen *et al.* (2006) recensent les architectures de pilotage distribué à base de systèmes multi agents. Parmi ces architectures, nous pouvons citer celles de Shaw (1988), Tomiyama (1997), Kondoh *et al.* (1999, 2000), Maturana *et al.* (2004), l'architecture YAMS (« *Yet Another Manufacturing System* ») de Parunak (1987), l'architecture AARIA (« *Autonomous Agents for Rock Island Arsenal* ») de Parunak *et al.* (1998), l'architecture IFCF de Lin et Solberg (1992), et enfin l'architecture du projet européen PABADIS (« *Plant Automation Based on Distributed Systems* ») [PABADIS, 2002].

Shaw (1988) a proposé qu'une cellule de production puisse sous traiter du travail à d'autres cellules en utilisant un mécanisme d'enchères (« *Bidding mechanism* »). Il a décrit une structure de contrôle distribué pour l'ordonnancement dynamique dans un système manufacturier ayant trois types de cellules : dépôt (« *Warehouse Cell* »), palette (« *Pallet Cell* ») et robot (« *Robot Cell* »). Un agent est associé à chaque cellule. Chaque agent maintient des informations locales et agit indépendamment en échangeant des messages, sans aucun contrôle global. L'affectation des tâches est effectuée dynamiquement moyennant le mécanisme d'enchères. L'ordonnancement des tâches est effectué localement par chaque agent. Des travaux récents ont étendu les travaux de Shaw [Tomiyama, 1997 ; Kondoh *et al.*, 1999 ; Kondoh *et al.*, 2000].

Parunak (1987) a introduit l'architecture YAMS (« *Yet Another Manufacturing System* ») dans laquelle un agent est associé à chaque atelier et à chaque ressource. Le réseau contractuel (« *Contract Net Protocol* ») est utilisé comme protocole de négociation entre les agents.

Plus tard, Parunak *et al.* (1998) ont décrit l'architecture AARIA (« *Autonomous Agents for Rock Island Arsenal* ») qui est une architecture multi agents pour l'ordonnancement et le pilotage de systèmes de production. Cette approche repose sur une vision discrète de la

production dans laquelle les pièces se déplacent dans un réseau d'unités de traitement et de zones de stockage [Pujo *et al.*, 2002a]. Trois classes d'agents, ayant chacune des connaissances spécifiques, sont utilisées : les agents ressources, les agents unités de traitement et les agents pièces. Un agent ressource (machine, outil, opérateur) intègre les connaissances nécessaires au pilotage de la ressource associée et à la gestion de ses engagements avec les différentes unités de traitement qui l'utilisent. Un agent unité de traitement possède une représentation des types de ressources et de pièces en entrée qui lui sont nécessaires. Un agent pièce connaît l'unité de traitement qui peut fournir ou consommer ces pièces ainsi que la production ou la demande de ces pièces au cours du temps. Chacun de ces agents est autonome par rapport aux autres. La coordination de l'ensemble s'effectue en utilisant un protocole basé sur l'économie de marché de type réseau contractuel (« *Contract Net Protocol* ») [Parunak *et al.*, 1998 ; Pujo *et al.*, 2002a].

Lin et Solberg (1992) ont développé l'architecture IFCF pour le pilotage d'un atelier de production. Ils associent des agents aux produits et aux ressources. Pour satisfaire leurs objectifs individuels, les agents négocient entre eux en temps réel. Les auteurs ont développé un protocole de négociation basé sur le principe de marché d'échange pour mettre en œuvre l'allocation de ressource et l'ordonnancement distribué [Lin et Solberg, 1992]. Ils ont montré à travers des simulations que l'architecture proposée est flexible et adaptative. Leur travail a inspiré le développement de plusieurs autres protocoles de négociation [Saad *et al.*, 1997 ; Krothapalli et Deshmukh, 1997, 1998 ; Usher et Wang, 2000].

Le projet européen PABADIS (« *Plant Automation Based on Distributed Systems* ») définit une approche de pilotage décentralisé de la production basée sur l'organisation dynamique des ressources dans un environnement changeant et distribué [PABADIS, 2002]. Un système PABADIS est organisé autour d'unités de fabrication appelées CMU (« *Cooperative Manufacturing Units* »). Un CMU comprend une ou plusieurs fonctions fournissant des capacités manufacturières de production, un ensemble de supports de services communs pour exploiter l'environnement de PABADIS et un Agent hôte. De plus, il peut inclure n'importe quelle ressource matérielle ou logicielle utile pour effectuer ses fonctions et ses services. Ainsi, on distingue les CMU physiques qui sont utilisés pour le traitement physique des produits (les machines individuelles, les cellules flexibles, les lignes de production), et les CMU logiques qui fournissent des services de calcul, d'archivage, etc.

La mise en œuvre d'un système PABADIS est réalisée à travers des plateformes d'agents mobiles. Ces agents sont de trois types : des agents résidentiels, des agents de production, et des agents de management. Les agents résidentiels sont attachés à un CMU et permettent à d'autres agents d'utiliser les ressources du CMU. Les agents de production sont attachés à un produit et sont responsables de sa réalisation. Ces agents sont mobiles et se déplacent de CMU en CMU en accompagnant le produit en cours d'élaboration. Enfin, les agents de management servent à collecter de l'information ou à contrôler des actions en cours.

En ce qui concerne les applications industrielles du pilotage par les systèmes multi agents, Leita (2008) recense un certain nombre de travaux conduits par exemple par Colombo *et al.* (2006), et Maturana *et al.* (2004).

Les entreprises *Schneider Electric GmbH* et *DaimlerChrysler AG – Research and Technology* ont coopéré pour développer et implémenter un système de pilotage collaboratif, à base d'agents hétérogènes, nommé *FactoryBrokerTM*. Ce système est destiné au pilotage de

ressources hétérogènes et hautement distribuées dans des environnements perturbés et où le respect de contraintes temps réel strictes est crucial [Colombo *et al.*, 2006].

Finalement, Maturana *et al.* (2004) ont développé un système multi agents pour le pilotage du système de refroidissement et de chauffage d'eau, la ventilation et le conditionnement d'air à bord des navires de l'armée américaine. Les agents intelligents représentent des ressources physiques (telles que valves, machines de refroidissement, etc.) ainsi que des fonctions spécifiques du navire (système de rafraîchissement d'eau, système électrique, système de manutention, système de combat, ...). Les agents utilisent le réseau contractuel pour établir des négociations dynamiques entre eux.

1.4.4.2. Pilotage holonique

Le pilotage holonique met en œuvre un système qui repose sur un ensemble d'entités autonomes, intelligentes, flexibles et distribuées dites « *holons* ». Le concept de « *holon* » a été introduit par Arthur Koestler (1969) qui l'a défini comme « *partie d'un tout ou d'une organisation plus large, répondant strictement à trois conditions : être stable, avoir une capacité d'autonomie et être capable de coopérer* » [Koestler, 1969].

Un système de production holonique est une organisation de holons, dite « *holarchie* », qui coopèrent afin de réaliser un objectif commun et qui intègrent l'ensemble des activités de production (commande, conception, fabrication, etc.) et ceci afin de former une entreprise de production agile. Ainsi, dans un système holonique, les éléments de base comme les pièces, les machines, les produits, les outils, etc. ont des propriétés d'autonomie et de coopération. Un holon peut faire partie d'un autre holon. La technologie utilisée pour modéliser un holon comprend des entités constituées à la fois d'une partie logicielle et d'une partie matérielle.

Le concept holonique a été mis en œuvre dans plusieurs domaines tels que la planification [Denkena *et al.*, 2002], l'ordonnancement [Leitao *et al.*, 2008], la gestion de stock et d'entrepôt [Babiceanu *et al.*, 2004], et le pilotage d'atelier [Brennan *et al.*, 1997 ; Bruckner *et al.*, 1998 ; Liu *et al.*, 2000 ; Fletcher *et al.*, 2003 ; Monch *et al.*, 2003 ; Blanc *et al.*, 2008].

Plusieurs de ces travaux reposent sur l'architecture PROSA (« *Product-Resource-Order-Staff Architecture* ») introduite par des chercheurs de l'Université Catholique de Louvain [Brussel *et al.*, 1998 ; Valckenaers *et al.*, 1999].

PROSA est une architecture holonique de référence basée sur des holons représentant les produits, les ressources, les ordres (de fabrication) et des activités logiques [Leitao, 2004]. Un holon ressource contient la ressource ainsi qu'une unité de traitement qui contrôle la ressource. Un holon produit détient la connaissance sur le produit et les plans de production permettant d'aboutir à ce produit. Un holon ordre représente les informations sur les commandes clients et les tâches de production du produit. Ces holons de base sont assistés et orientés par des holons représentant des activités logiques telles que l'ordonnancement.

1.4.4.3. Pilotage par le produit

Le pilotage par le produit est une déclinaison de l'approche distribuée, visant à articuler les diverses activités de l'entreprise autour de produits *actifs*, capables d'interagir avec les entités et les acteurs qui gravitent autour d'eux [McFarlane *et al.*, 2003].

Le pilotage par le produit fait référence au concept de « *produit intelligent* » [Meyer *et al.*, 2009], qui aurait été introduit par Ives et Vitale dès 1988 [Ives et Vitale, 1988]. L'idée d'intégrer l'intelligence et le contrôle au niveau du produit a donné lieu à des travaux dans le domaine du pilotage de systèmes de production [McFarlane *et al.*, 2003 ; Trentesaux, 2009]. Dans ce domaine, les nouvelles technologies d'auto identification, telles que l'identification radio fréquence RFID (« *Radio Frequency Identification* ») et les réseaux de capteurs sans fils (« *Wireless Sensors Networks* »), ont rendu possible la traçabilité des produits à travers tout le système de production.

Ces technologies, associées aux technologies agents et à l'intelligence artificielle, permettent de doter le produit de capacités de mémorisation, de calcul, de décision et de communication. Le produit devient alors « *actif* » dans le système de production au sein duquel il évolue. Il devient non seulement sensible aux variations des conditions de son environnement, mais aussi capable d'interagir avec cet environnement en utilisant les capacités de décision qui lui ont été conférées [Meyer *et al.*, 2009].

D'après Meyer *et al.* (2009), des travaux basés sur le pilotage par le produit ont été menés pour :

- améliorer les performances du pilotage opérationnel des systèmes de production [McFarlane *et al.*, 2002 ; Pétin *et al.*, 2007 ; Bussmann et Schild, 2001 ; Schild et Bussmann, 2007 ; Salles *et al.*, 2009],
- aller vers une plus grande personnalisation des produits [Feare, 2000],
- rendre plus efficaces et efficaces les changements d'outillages et de processus lors de la production de différentes variantes de produits [Trovinger et Bohn, 2005].

En France, le pilotage par le produit représente une des voies de recherche préconisées par le Comité d'Experts en Productique du CNRS, dans sa dernière analyse prospective [Bourrières *et al.*, 2007]. Depuis quelques temps émerge une communauté scientifique qui s'intéresse aux systèmes contrôlés par le produit [Bajic *et al.*, 2007].

1.4.5. Architecture distribuée supervisée

Certains travaux de recherche ont essayé de bénéficier des avantages des deux architectures hiérarchique et hétérarchique (distribuée) tout en s'affranchissant de leurs inconvénients respectifs. Ces travaux ont alors proposé une architecture hybride : l'architecture distribuée supervisée. Cette architecture, illustrée par la Figure 1.10, représente un compromis entre une architecture hiérarchisée et une architecture distribuée.

Dans cette architecture hybride, les unités de contrôle d'un même niveau hiérarchique sont interconnectées via un même moyen de contrôle. Elles sont capables de communiquer et de coopérer pour satisfaire leurs objectifs locaux. Lors de perturbations, l'ensemble des unités de contrôle peut demander de l'aide à leur moyen de contrôle pour résoudre les problèmes détectés.

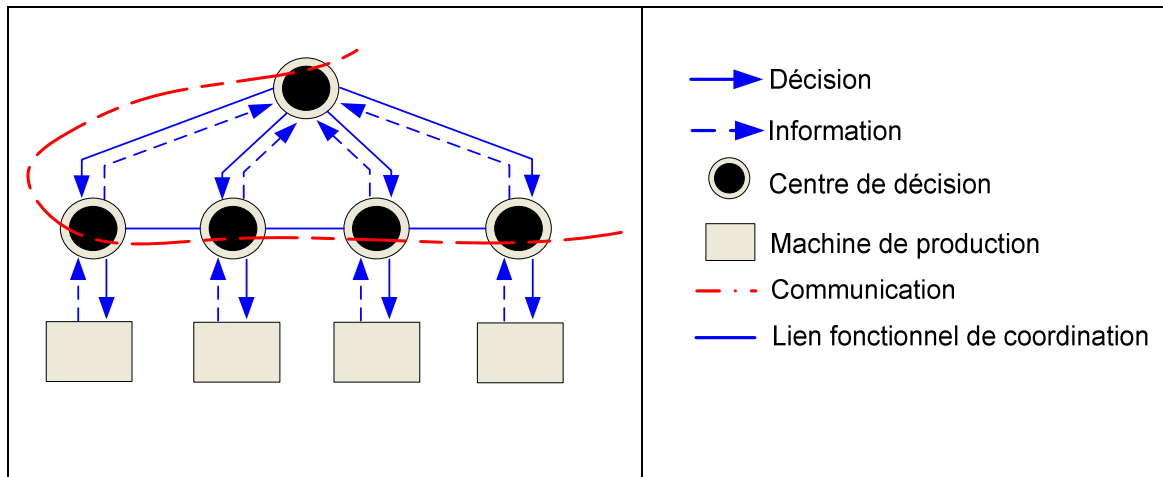


Figure 1.10 : Structure distribuée supervisée.

Plusieurs auteurs ont proposé des architectures de pilotage distribué supervisé.

Ainsi, par exemple, Tawegoum *et al.* (1994) présentent une architecture hybride de pilotage pour un atelier de production flexible [Tawegoum *et al.*, 1994]. Dans leur modèle, les centres de décision d'un niveau inférieur requièrent l'aide des centres de décision de niveau plus élevé en cas de non respect de leurs objectifs locaux à cause de perturbations inattendues. L'organisation hiérarchique permet la coordination entre des centres de décision distribués, alors que des considérations hétérarchiques confèrent aux centres de décision de niveaux inférieurs une autonomie partielle par rapport aux centres de décision de niveau supérieur. Le niveau de pilotage en temps réel coopère avec l'ordonnancement pour aboutir à des actions de correction contre les perturbations.

Maturana *et al.* (1999) proposent une architecture hybride à base d'agents, nommée « *MetaMorph* », pour le pilotage de systèmes de production distribués [Maturana *et al.*, 1999]. Les agents représentent les ressources physiques et les produits. Des agents de médiation sont utilisés pour coordonner les interactions entre ces agents. Dans leur projet « *MetaMorph II* », Shen *et al.* (1998) étendent cette architecture pour intégrer les activités de planification, d'ordonnancement et d'exécution de l'entreprise avec ceux de ses fournisseurs, partenaires et clients [Shen *et al.*, 1998]. Ils emploient des médiateurs hiérarchiques et des mécanismes de négociation coopérative entre les agents.

Le projet MASCADA a pour objectif le développement de systèmes de pilotage réactifs, flexibles et reconfigurables [Peeters *et al.*, 1999 ; Valckenaers *et al.*, 1999]. Le système de pilotage est un système décisionnel multi niveaux dans lequel la coordination est assurée par la coopération entre les agents de différentes couches décisionnelles. La couche basse, appelée « couche exécution », est constituée d'agents représentant les équipements de production. Les autres couches correspondent à différents niveaux de planification. Les agents de la couche exécution possèdent une autonomie de décision sur les actions locales qu'ils doivent effectuer. La prise de décision relève d'une démarche ascendante, la couche d'exécution constituant le noyau de ce système à partir duquel toutes les décisions sont construites [Pujo *et al.*, 2002a].

Ottaway et Burns (2000) proposent un système adaptatif de pilotage de la production « *Adaptive Production Control System* » (APCS), dans lequel la transition entre la structure hétérarchique et hiérarchique se produit dynamiquement en fonction de la charge de travail de

système [Ottaway et Burns, 2000]. Dans leur approche, les auteurs considèrent trois types d'agents : agents tâches, ressources et superviseurs. Quand un agent constate que la ressource qu'il représente n'est pas utilisée correctement, il sollicite l'intervention d'un agent de surveillance pour le pilotage de la ressource. Ainsi un niveau de hiérarchie sera introduit dynamiquement dans le système.

1.5. Risques, perturbations et pilotage de la production

Les systèmes de pilotage de la production sont plongés dans un environnement qui génère de plus en plus d'événements. Lorsque ces événements gênent le fonctionnement normal ou prévu du système de production, ils représentent des « *perturbations* » qu'il incombe au système de pilotage de prendre en charge efficacement.

Dans les paragraphes suivants, nous commençons par analyser la notion de perturbation ainsi que la nature des impacts que l'occurrence d'une perturbation peut provoquer sur le système de production et son environnement.

1.5.1. Notion de perturbation

Plusieurs définitions des perturbations ont été proposées [Baillet, 1994 ; Kuivanen, 1996 ; Scherer, 1998 ; Cauvin, 2005]. Par exemple, selon Baillet (1994), une perturbation est « *toute information qui contredit une prévision faite aussi bien sur le fonctionnement du système opérant que sur l'évolution des objectifs élaborés à partir de la prévision de l'évolution de l'environnement* ».

Aussi, plusieurs classifications des perturbations existent [Saad et Gindy 1998 ; Matson et McFarlane 1998 ; Leitao, 2004 ; Cauvin, 2005]. Ainsi, Cauvin (2005) résume les principales catégories de perturbations reconnues en gestion de production dans la Figure 1.11.

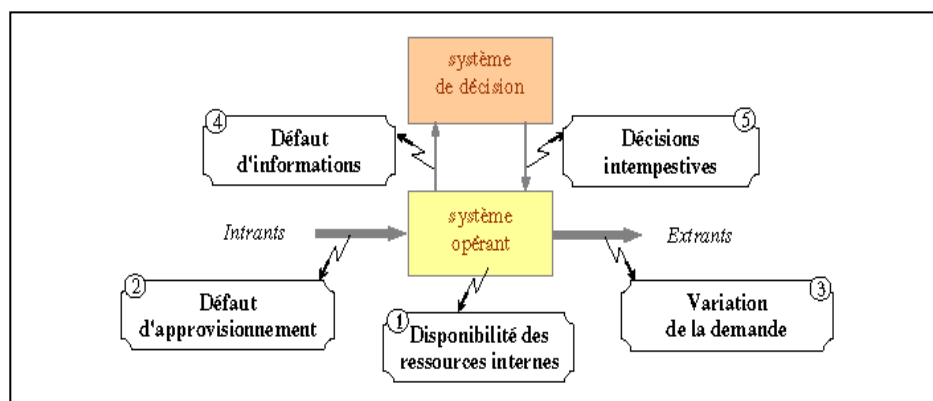


Figure 1.11 : Les principales catégories de perturbation en production [Cauvin, 2005].

Les perturbations générées par le système opérant (❶) sont parfois appelées « perturbations internes » [Saad et Gindy, 1998 ; Matson et McFarlane, 1998]. Ces perturbations sont dues aux problèmes liés à la disponibilité et la fiabilité des ressources matérielles (dysfonctionnement d'une opération, bris d'outils, panne, blocage ou accaparement d'une ressource, etc.) et/ou humaines (erreurs humaines, absentéisme, etc.) du système opérant.

Grabot et Geneste (1994) ont identifié quatre types principaux de perturbations internes : les rebuts, les non conformités, le blocage d'opérations et la défaillance de machines [Pujo *et al.*, 2002a].

Les perturbations de type rebuts correspondent à la fabrication de pièces non conformes et qui ne peuvent être reprises pour les rendre conformes. Ces pièces sont donc éliminées et doivent être relancées en urgence en fabrication, ce qui perturbe les plannings de production pré établis. Les perturbations de type non conformités correspondent à la fabrication de pièces qui, bien que non conformes, peuvent être reprises en production afin de corriger leurs défauts. Les perturbations de type blocage d'opérations surviennent essentiellement à la suite d'une rupture d'approvisionnement ou d'un bris d'outil. Enfin, les perturbations de type défaillance machine se produisent lorsqu'une machine tombe en panne. La machine est alors bloquée en attente d'une intervention de réparation et l'opération en cours d'exécution est suspendue [Pujo *et al.*, 2002a].

Les perturbations générées par l'environnement du système opérant sont parfois appelées « perturbations externes » [Saad et Gindy 1998]. Matson et McFarlane (1998) les répartissent davantage en perturbations amont et aval par rapport au système de production.

En amont du système de production, les aléas liés aux fournisseurs et sous-traitants (❷) se transforment en perturbations sur les intrants qui se traduisent par des défauts d'approvisionnement. Généralement, ces perturbations sont générées par des retards de livraison ou la présence de non-conformités dans les matières, pièces ou composants livrés.

En aval du système de production, les aléas liés aux marchés (❸) génèrent des perturbations sur les extrants. Leur origine est une variation de la demande des clients qui porte principalement sur la quantité ou les délais de livraison des produits. Dans cette catégorie de perturbations, sont classées, par exemple, les augmentations ou baisses soudaines du niveau des commandes dues à une variation de l'environnement, les erreurs et les écarts de prévisions.

Les aléas de fonctionnement du système d'information (❹) produisent des perturbations dans les transmissions de données. En découlent des défauts d'informations qui se traduisent soit par un manque total (l'information ne parvient pas à son destinataire), soit par une insuffisance (l'information est incomplète ou erronée). Concrètement, on trouve dans cette catégorie les perturbations générées par des défaillances humaines (oubli de transmission d'informations, erreurs de transcription de données ...) ou techniques (panne du matériel support de la communication ...).

Les aléas de fonctionnement du système de décision (❺) résultent généralement de solutions élaborées à la hâte ou sans prendre en compte certaines contraintes ou encore sans considération pour les conséquences qu'elles entraînent sur les autres activités de l'entreprise. C'est le cas, par exemple, de la décision du service commercial de proposer des délais de livraison excessivement courts pour enlever un marché au mépris de la capacité réelle de production du système opérant.

1.5.2. Impact des perturbations

Le fort degré d'intégration et d'interdépendance entre les composantes d'un système de production peut amener une perturbation à se propager rapidement au sein de ce dernier. Le système de production peut alors se retrouver dans des états indésirables (Kuivanen, 1996), dériver de ses objectifs initiaux de performance et/ou subir des conséquences préjudiciables (Aytug *et al.*, 2005) en termes de temps (rallongement ou raccourcissement des cadences de production, modification des dates prévues de début et de fin de tâches), de coût (inventaire, coût direct du produit, pénalités de retard), de disponibilité des matières (rupture suite à l'augmentation du taux de rebuts et/ou rejets), de qualité (non conformités aux spécifications clients), de dépendance (relations possibles avec d'autres tâches, ressources et/ou activités) et/ou de contexte (Aytug *et al.*, 2005).

1.6. Prise en compte des perturbations en pilotage

La fonction de pilotage joue un rôle crucial dans les systèmes de production pour assurer la coordination et le contrôle des tâches, réguler le fonctionnement des moyens de production et surtout réagir aux aléas et perturbations de la production.

Afin d'aboutir à une meilleure prise en compte des perturbations, des efforts ont été entrepris au niveau de la collecte et du traitement de l'information, et au niveau de la prise de décision. Ces efforts sont explicités dans les sections suivantes.

1.6.1. Prise en compte par les systèmes d'information

La prise en compte des perturbations en pilotage nécessite la mise en œuvre de fonctionnalités et de structures pour assurer la collecte des informations à partir des organes physiques de l'atelier, éventuellement leur prétraitement et la transmission de ces informations aux centres de décisions.

Pour assurer l'intégration entre les données de l'atelier et les systèmes de gestion de l'entreprise – tels que les ERP (« *Enterprise Resource Planning* »), les APS (« *Advance Planning and Scheduling* »), etc. – des systèmes dits d'exécution de la fabrication (« *Manufacturing Execution Systems* », MES) ont été développés [Hadjimichael, 2004 ; Cheng *et al.*, 2006 ; Blanc *et al.*, 2008, Saenz de Ugarte *et al.*, 2009].

Le groupe MESA International (association d'échange d'information sur les MES) a ainsi proposé plusieurs normes contribuant à une définition rigoureuse d'un cadre de conception et de mise en œuvre de systèmes MES. La norme ANSI/ISA – 95 [ISA, 2000] reprend les définitions de l'association MESA et formalise les activités d'un système MES en un ensemble de modèles conceptuels et fonctionnels.

Cette norme a évolué vers la norme IEC/ISO 62264 [IEC, 2003] qui est une norme internationale de référence pour tout acteur ayant une activité liée aux MES. Cette norme propose un modèle d'opérations de production qui définit les rôles d'un système MES pour chaque domaine d'application dans un système de production.

Comme l'illustre la Figure 1.12, un système MES regroupe l'ensemble des outils assurant une partie ou la totalité des onze fonctions des MES définies par l'association internationale MESA. Parmi ces fonctions, on retrouve l'ordonnancement temps réel détaillé, l'allocation

des ressources, le contrôle des documents, la traçabilité des produits, l'acquisition des données et la conduite, la gestion de la maintenance, la gestion de la qualité et l'analyse des performances.

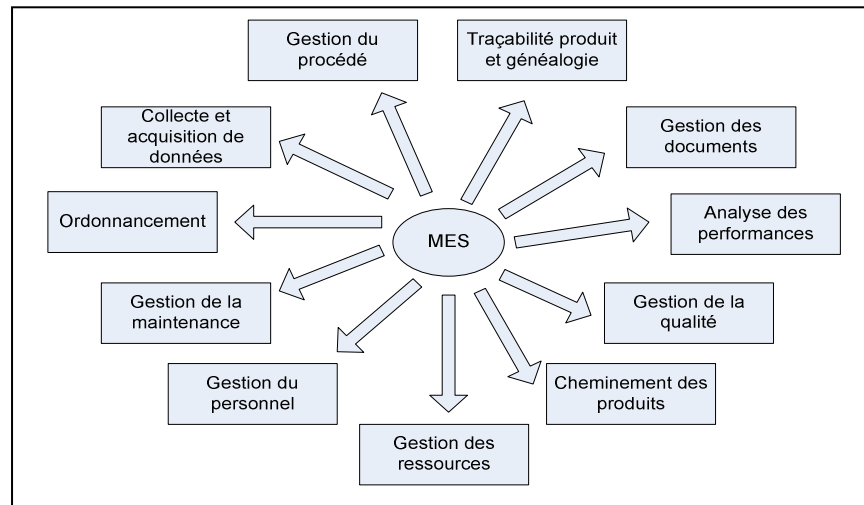


Figure 1.12 : Les onze fonctions d'un système MES. Inspiré de [MESA, 1997]

Malheureusement, malgré l'exhaustivité des fonctions offertes par les systèmes MES disponibles à l'heure actuelle, plusieurs auteurs, tels que [Saenz de Ugarte *et al.*, 2009], soulignent l'absence de fonctions dédiées à la prise en compte et à la gestion de perturbations dans les MES. Ces auteurs soulignent aussi la nécessité de développer des modèles permettant d'apporter une aide à la décision en vue de réagir aux perturbations.

1.6.2. Prise en compte par l'aide à la décision

La prise en compte des perturbations par l'aide à la décision s'intéresse à l'élaboration de solutions pour résoudre des conflits et pallier les aléas. Les efforts entrepris dans ce sens tentent de proposer des solutions en fonction des objectifs prédéfinis et de l'environnement courant de l'atelier, perçu au travers des systèmes d'information tels que les MES, chaque fois qu'une décision doit être prise.

Monostori *et al.* (1998) distinguent deux approches permettant de prendre en compte les perturbations : soit par la promotion de la pro activité et de la réactivité des systèmes, soit par la distribution des décisions de pilotage.

1.6.2.1. Promotion de la pro activité et de la réactivité des systèmes

La promotion de la pro activité et de la réactivité des systèmes repose sur l'utilisation de systèmes d'ordonnancement respectivement pro actifs et prédictifs/réactifs. De nombreux travaux ont fait l'état de l'art de ces approches, par exemple [Vieira *et al.*, 2003 ; Aytug *et al.*, 2005].

Les systèmes d'ordonnancement pro actifs sont capables d'anticiper l'occurrence de perturbations en produisant des plans de récupération qui pré intègrent des solutions aux perturbations anticipées. Ces solutions peuvent être appliquées dès que la perturbation a effectivement lieu. Parmi les travaux dans ce domaine, on retrouve les approches

d'ordonnancement robuste [Aytug *et al.*, 2005], et les approches par séquence de groupes de tâches permutables [Pujo *et al.*, 2002b].

Les systèmes d'ordonnancement prédictifs/réactifs reposent sur un processus à deux étapes. D'abord, un planning prédictif représentant le comportement désiré du système de production sur l'horizon temporel considéré est généré. Ce planning est ensuite modifié durant l'exécution en réponse à l'occurrence de perturbations. Parmi les travaux dans ce domaine, on retrouve les approches de ré ordonnancement partiel ou complet, et les approches de réparation d'ordonnancement [Aytug *et al.*, 2005].

Bruccoli *et al.* (2003) recensent les travaux les plus récents (depuis 1990) en ordonnancement qui ont traité des perturbations. Vieira *et al.* (2003) présentent un cadre conceptuel pour l'analyse et la classification des travaux sur le ré ordonnancement de systèmes de production. Les auteurs recensent les principaux types de perturbations qui ont été traités. Ces types de perturbations sont :

- Les pannes de machines
- Les commandes urgentes
- L'annulation de commandes
- Le changement de dates d'échéances
- Retards de livraison de fournisseurs ou ruptures de stock
- Le changement de priorité d'une commande
- Les reprises et les problèmes qualité
- La mauvaise estimation des temps de traitement
- L'absentéisme d'opérateurs

Vieira *et al.* (2003) référencent les travaux qui ont traité chacun de ces types de perturbations. Ils soulignent que la plupart de ces travaux traitent uniquement des pannes machines. Les auteurs mentionnent que très peu de travaux considèrent plus qu'un type de perturbation à la fois, et que l'algorithme de ré ordonnancement tient compte spécifiquement du type de perturbation traité. Il n'existe donc pas d'approche d'ordonnancement/ré ordonnancement qui présente des concepts qui soient assez génériques pour prendre en compte plus d'un type de perturbation à la fois.

Par ailleurs, les alternatives de réponse aux perturbations que ces systèmes d'ordonnancement offrent restent limitées. Ceci s'explique par le fait que, par définition, ces systèmes reposent sur un nombre réduit de décisions de pilotage, lesquelles sont les décisions d'affectation/réaffectation de ressources, les décisions d'ordonnancement/ré ordonnancement et les décisions de séquençement d'opérations. D'autres décisions, telles que par exemple le recours à des fournisseurs de substitution, de faire appel à des sous traitants, de changer les gammes de fabrication, de négocier d'autres délais avec les clients, ... ne sont souvent pas utilisées.

1.6.2.2. Distribution des décisions de pilotage

Un inconvénient majeur des architectures de pilotage hiérarchisées réside dans le fait que leur structure peut être excessivement rigide et par conséquent difficile à adapter aux perturbations. Par définition, la nature distribuée des architectures de pilotage par les systèmes multi agents offre de la flexibilité et de la réactivité face aux perturbations [Odrey et Mejia, 2003].

Le traitement des perturbations par de telles approches a été abordé dans la littérature sous différentes dénominations. Dans ce sens, un nombre relativement réduit de systèmes de gestion d'erreurs [Odrey et Mejia, 2003], tolérants aux fautes [Fletcher et Deen, 2001] et de gestion de perturbations [Leitao et Barbosa, 2006] ont été proposés. Dans la suite, nous nous limitons à la présentation de quelques approches de pilotage typiques qui montrent les manières avec lesquelles la problématique de la réaction aux perturbations a été envisagée. Le [Tableau 1.1](#) permet de récapituler ces approches.

Bussmann et Schield (2001) présentent une approche de pilotage par le produit, nommée « *West* ». Cette approche développe des mécanismes de routage et d'allocation dynamique des ressources pour le pilotage d'un système de production de masse, flexible, de l'industrie automobile [Bussmann et Schild, 2001]. Le système de production met en œuvre des machines redondantes flexibles, reliées par un système de transport flexible. Trois types d'agents sont utilisés : les agents pièces, les agents machines et les agents de transport.

Les agents pièces énoncent des enchères et les agents machines émettent leurs offres pour s'attribuer l'exécution des tâches associées aux pièces. Un agent pièce collecte les offres des agents machines puis sélectionne la prochaine machine sur laquelle la pièce sera traitée. Cette sélection tient compte de l'encours de pièces dans les files d'entrée et de sortie de cette prochaine machine. La file d'entrée d'une machine contient l'ensemble des pièces en attente de traitement sur cette machine. La file de sortie d'une machine contient l'ensemble des pièces qui ont déjà été traitées par cette machine, mais qui n'ont pas encore fixé leur prochaine destination.

Les agents pièces négocient aussi leur routage dans le système avec les agents de transport. Ces derniers essaient d'acheminer directement les pièces vers leurs destinations. Si un chemin direct n'est pas trouvé, alors un chemin alternatif est affecté à la pièce. Toutefois, la priorité de la pièce est augmentée, de façon qu'elle ne reste pas indéfiniment dans le système.

Cette approche peut gérer des perturbations de type problèmes des ressources (pannes machines, pannes des unités de contrôle, ...) et changement de production (traitement de plusieurs variétés de produits) grâce aux mécanismes de routage et d'allocation dynamique des ressources. Lorsqu'une panne machine survient, la machine continue de répondre aux enchères en émettant des offres et en recevant des pièces dans sa file d'entrée jusqu'à ce que cette file soit pleine. Dans ce cas, en examinant les offres aux enchères, les agents pièces évitent de sélectionner la machine en panne, et vont plutôt opter pour les machines équivalentes qui sont moins chargées. Ce mécanisme permet ainsi de trouver dynamiquement des affectations alternatives aux pièces en cas de panne d'une machine.

Par contre cette approche ne développe pas de mécanismes ou de concepts particuliers pour la détection, l'identification ou la mémorisation des pannes ou de leur traitement. Le mécanisme d'affectation dynamique fait en sorte que les agents pièces évitent les ressources en panne, en trouvant des machines équivalentes ou des routages alternatifs. Les auteurs n'ont pas fait mention d'autres types de perturbations. Ils ont évalué leur approche dans une industrie automobile et ils reportent des performances proches de l'optimal [Schild et Bussmann, 2007].

Tranvouez (2001) présente l'approche MACSS (« *Multi Agent Cooperative reScheduling System* ») de pilotage d'ateliers de production de type job shop soumis à des perturbations de

type pannes machines. L'auteur propose de réagir aux pannes des machines par le ré ordonnancement coopératif de l'atelier. Sa méthode accorde une autonomie aux machines de production, leur permettant de coopérer entre elles afin de traiter une perturbation au plus tôt.

Le système MACSS comporte deux types d'agents : les agents services, et les agents ordonnanceurs. Les agents services maintiennent des informations sur les noms, les adresses physiques et les compétences de tous les agents. En particulier, un agent interface permet à un décideur humain d'interagir directement avec le système notamment pour introduire des perturbations et assurer ainsi la fonction de détection.

Les agents ordonnanceurs reflètent l'organisation de l'atelier de production. En particulier, un agent est associé à chaque machine, et un agent est associé à l'atelier pour jouer le rôle de coordinateur entre les agents machines.

A l'occurrence d'une panne machine, les agents ordonnanceurs coopèrent entre eux en s'échangeant des tâches et en effectuant des modifications locales et limitées de leurs ordonnancements perturbés. L'activité de chaque agent est spécifiée par des plans comportementaux décrits par des graphes d'état fortement typés. Ces plans représentent un ensemble d'opérations de réparation d'ordonnancement (permutation, décalage, ...) et de stratégies de ré ordonnancement. La coopération est mise en œuvre par le protocole du réseau contractuel.

Bruccoli *et al.* (2003) proposent une approche similaire à celle de Tranvouez (2001) en ce sens que les décisions de pilotage sont prises par des agents associés à des ressources de production reconfigurables. Un système de production reconfigurable est constitué de machines modulaires et flexibles, dont la structure est modifiable (permettant l'ajout de composants tels que des axes, ...), et de contrôleurs reconfigurables faisant partie d'une architecture ouverte. Un système de production reconfigurable peut ainsi être facilement reconfiguré au niveau du système (changer l'agencement « *layout* » de la configuration), au niveau de la machine (ajouter un nouveau composant), et/ou au niveau du contrôle (intégrer un nouveau module logiciel).

Les auteurs considèrent le problème de la réaction à des perturbations de type pannes machines dans un système de production reconfigurable qui n'offre pas d'alternatives de routage. Dans ce cas, les auteurs considèrent que le traitement de ces perturbations consiste à déterminer un ensemble de machines susceptibles d'être reconfigurées pour remplacer une machine en panne, à sélectionner une machine pour être reconfigurée, et enfin à déterminer les pièces (nombre et type) à déplacer de la machine en panne vers la machine reconfigurée.

Pour ce faire, les auteurs développent un protocole de négociation entre les agents machines et des mécanismes de raisonnement internes à chaque agent. Le protocole de négociation est basé sur le réseau contractuel. Les mécanismes de raisonnement sont eux basés sur des règles heuristiques et sur la logique floue.

Par contre, Tranvouez (2001) et Bruccoli *et al.* (2003) ne développent pas de mécanismes ou de concepts particuliers pour la détection, l'identification ou la mémorisation des pannes ou de leur traitement. Les auteurs ne mentionnent pas non plus d'autres types de perturbations.

Odrey et Mejia (2003) proposent une modélisation d'une architecture de pilotage hybride, alliant la discipline des systèmes hiérarchisés et l'agilité des systèmes multi agents. Les auteurs considèrent des ateliers de production hiérarchisés en trois niveaux : cellule, station de travail et machine. Trois types d'agents permettent de piloter chaque niveau : les agents de production, les agents de traitement des perturbations (« *recovery agents* ») et les agents médiateurs. Les agents de chaque niveau communiquent avec les agents des niveaux supérieur et inférieur de la hiérarchie. Les perturbations traitées sont de type erreurs et pannes des machines.

Les agents de production sont de deux types : des agents de planification et des agents de contrôle. Les agents de planification sont responsables de la création et de l'optimisation des plannings des opérations reçues du niveau supérieur de la hiérarchie. Les agents de contrôle sont responsables de l'exécution des plannings établis par les agents de planification.

Les agents de traitement des perturbations (« *recovery agents* ») offrent des services de diagnostic et de traitement des perturbations. Ces agents reçoivent des rapports détaillés contenant toutes les informations relatives aux perturbations, telles que les mesures des capteurs, la localisation des erreurs, la priorité de traitement, etc. Dans le cas où une action de traitement peut être proposée, cette proposition est communiquée aux agents médiateurs. Si une telle action ne peut pas être proposée, un agent peut solliciter la collaboration d'autres agents de traitement des perturbations ou l'intervention d'opérateurs humains.

Les agents médiateurs sont des intermédiaires entre les agents de production et les agents de traitement des perturbations. Ces agents :

- Filtrant et traitent les informations des capteurs, acquises à travers les agents de production,
- Classifient les perturbations et effectuent des diagnostics préliminaires en se basant sur les informations des capteurs,
- Sélectionnent les actions de traitement des perturbations à appliquer pour une situation donnée,
- Communiquent le plan de traitement des perturbations aux agents de production.

Bien que les auteurs soulignent l'importance des fonctions de détection, d'identification et de traitement des perturbations, ils se contentent de présenter une modélisation par une extension des réseaux de pétri colorés de leur architecture. Ils ne donnent pas de plus amples détails sur les mécanismes permettant de mettre en œuvre ces fonctions ou la manière avec laquelle les agents vont collaborer. Les auteurs n'évoquent pas la mémorisation des perturbations ou de leur traitement.

Leitao (2004, 2008) propose l'architecture holonique ADACOR (« *Adaptive Control Architecture* ») pour le pilotage distribué d'ateliers de production flexibles. Cette architecture implique trois types de holons : le holon tâche, le holon opérationnel et le holon superviseur.

- Les holons tâches représentent les ordres de production lancés. Ces holons contiennent des informations sur la production du produit et sur la progression de l'exécution de l'ordre de production.
- Les holons opérationnels représentent les ressources physiques et les opérateurs disponibles.

- Les holons superviseurs assurent la coordination entre des holons tâches et des holons opérationnels et leurs offrent des services d'optimisation.

Cette architecture peut gérer des pannes machines, des retards d'opérations, des annulations ou des modifications d'ordres et des ordres urgents.

Leitao et Barbosa (2006) mentionnent que chaque type de holon est doté des fonctions de détection, d'identification, de réaction et de prédiction de perturbations. Toutefois, les auteurs ne précisent ni le partage, ni la communication d'information sur les perturbations entre ces holons.

Leitao (2004) propose de réaliser la fonction de détection par la surveillance de symptômes, tels que des valeurs ou des états inattendus de capteurs, des retards, des problèmes de qualité de produit, etc. Cette surveillance peut être active ou passive.

Dans la surveillance active, un holon spécifique est dédié à la surveillance des symptômes. Cet holon maintient une liste de holons à avertir lors de l'occurrence des symptômes. Leitao (2004) ne donne pas de précisions supplémentaires sur le rôle de cet holon spécifique dans l'architecture. Dans la surveillance passive, chaque holon surveille sa propre liste de symptômes, ce qui laisse entendre que la fonction de détection est dupliquée dans tous les holons.

Leitao (2004) propose d'utiliser une base de règles et un système d'inférence pour réaliser la fonction d'identification des perturbations. L'auteur décrit chaque type de perturbation traité par le système en lui associant des symptômes. La base de règles définit les règles qui relient les symptômes aux types de perturbations. A partir de la détection de l'occurrence de symptômes, le système d'inférence utilise la base règles pour identifier les types de perturbation possibles. L'auteur ne précise cependant pas si cette base de règles et ce moteur d'inférence sont distribués, c'est-à-dire si chaque holon dispose de sa propre base de règles et de son propre moteur d'inférence, ou si ces outils sont centralisés et offrent leurs services aux holons qui les requièrent.

Leitao (2004) souligne la nécessité de mémoriser la connaissance sur les perturbations et les solutions ayant permis de les traiter, mais ses travaux n'ont pas pour vocation particulière de structurer cette connaissance.

L'auteur considère la réaction aux perturbations traitées par le ré ordonnancement dynamique. Pour ce faire, il développe un protocole d'allocation de ressources qui est une extension du réseau contractuel (« *Contract Net* »). Chaque type de holon a été doté d'un modèle de comportement spécifiquement conçu pour chaque type de perturbation. Leitao (2004) décrit ces modèles de comportement en se basant sur les réseaux de pétri. En cas d'occurrence d'un des types de perturbation traités, les holons tâches et les holons opérationnels négocient entre eux pour aboutir à une réaffectation des ressources aux tâches perturbées. Suite à l'obtention d'une réaffectation, une optimisation globale peut être conduite en faisant appel aux holons superviseurs.

Tableau 1.1 : Quelques approches de gestion de perturbations.

Référence	Système de production	Type de perturbation	Mécanismes de gestion des perturbations	Actions de pilotage
West [Busmann et Schild, 2001]	Système de production de masse flexible, industrie automobile. Le système met en œuvre des machines redondantes flexibles, et un système de transport flexible.	Pannes machines, Pannes des unités de contrôle Changements de produits	<ul style="list-style-type: none"> • Mécanisme d'enchères entre les agents pièces et les agents machines. • Mécanisme de négociation entre les agents pièces et les agents de transport pour assurer le transport des pièces. 	<ul style="list-style-type: none"> • Allocation dynamique des tâches aux machines • Routage dynamique des pièces utilisant un système de transport flexible
MACSS [Tranvouez, 2001]	Atelier de type job shop	Pannes machines	Mécanisme de coopération entre agents machines basé sur le protocole du réseau contractuel (« <i>Contract Net</i> ») et sur des modèles de comportement des agents spécifiés par des graphes d'état fortement typés.	Réaction par le ré ordonnancement coopératif entre agents machines de production.
[Bruccoli et al., 2003]	Systèmes de production reconfigurables	Pannes machines	<ul style="list-style-type: none"> • Mécanisme de coopération entre agents machines basé sur le protocole du réseau contractuel (« <i>Contract Net</i> ») • Mécanisme de raisonnement basé sur des règles heuristiques et la 	<p>Trois types de décisions :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Décider si oui ou non un ensemble de machines doit être reconfiguré pour remplacer une machine en panne • Sélectionner une machine pour être reconfigurée

Référence	Système de production	Type de perturbation	Mécanismes de gestion des perturbations	Actions de pilotage
			logique floue pour déterminer les pièces à déplacer d'une machine en panne vers une machine reconfigurée	<ul style="list-style-type: none"> Déterminer les pièces (nombre et type) qui doivent être déplacées de la machine en panne vers la machine reconfigurée
ADACOR [Leitao, 2004]	FMS (CIM center of Porto)	pannes machines retards d'opérations ordres urgents annulations d'ordres modifications d'ordres	<ul style="list-style-type: none"> Détection par des symptômes, Identification par des règles, Réaction par la réaffectation de ressources basée sur le protocole du réseau contractuel (« <i>Contract Net</i> ») étendu et sur des modèles de comportement spécifiques (à base de réseaux de pétri) 	Ré ordonnancement Réaffectation de ressources

1.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés au pilotage de systèmes de production en environnement perturbé. D'une part nous avons présenté les concepts fondamentaux du pilotage de systèmes de production : horizons, objectifs, architectures, entités pilotées et décisions de pilotage mises en oeuvre. D'autre part nous avons décrit comment un système de production pourrait être perturbé. Nous avons alors introduit les concepts fondamentaux relatifs aux perturbations et à leurs conséquences sur les systèmes de production.

Nous avons consacré un paragraphe à l'étude des différentes architectures de pilotage existantes. En nous concentrant plus particulièrement sur les travaux en pilotage capables de prendre en compte les perturbations, nous avons constaté des efforts axés sur deux aspects.

Le premier aspect est relatif au développement de systèmes d'information, tels que les systèmes MES d'exécution manufacturière, destinés à la collecte des informations à partir des organes physiques de l'atelier, éventuellement leur prétraitement et la transmission de ces informations aux centres de décisions. Dans ce sens, plusieurs auteurs, tels que [Saenz de Ugarte *et al.*, 2009], soulignent que les systèmes MES existants ne comportent pas de fonction spécifiquement dédiée à la gestion des perturbations, et la nécessité de développer des modèles permettant d'apporter une aide à la décision pour réagir aux perturbations.

Le deuxième aspect concerne l'élaboration de solutions pour résoudre des conflits et pallier les aléas. Nous avons constaté que les efforts entrepris dans ce sens concernent le développement de systèmes d'ordonnancement et de ré ordonnancement proactifs ou réactifs, et la proposition d'approches de pilotage distribué destinées à prendre en compte des perturbations.

En ce qui concerne l'ordonnancement et le ré ordonnancement des systèmes de production, nous avons constaté que ces systèmes n'exploitent que des décisions de pilotage restreintes aux décisions de réaffectation et de séquençement des opérations sur les ressources de production. En réalité, d'autres types de décisions, qui peuvent contribuer à une meilleure réaction aux perturbations – telles que les décisions de maintenance, de sous-traitance ou de réapprovisionnement – sont peu ou pas considérés par ces systèmes.

En ce qui concerne les approches de pilotage distribué considérant des perturbations, l'examen d'approches typiques dans ce domaine nous a permis de constater que la fonction de traitement des perturbations a été soit centralisée dans un nombre très réduit d'agents [McFarlane *et al.*, 1995], soit entièrement affectée à chaque agent individuel sans partage d'information sur les perturbations considérées [Leitao 2004, Leitao et Barbosa, 2006].

Le plus souvent, les perturbations sont prises en compte de façon limitée et sont traitées en recourant à des décisions d'affectation/réaffectation de tâches aux ressources, ou d'ordonnancement/ré ordonnancement. La prise de ces décisions est soit confiée aux produits, dans le cas d'approches de pilotage par le produit telles que celle de Bussmann et Schild, (2001), soit confiée aux ressources, comme dans le cas d'approches similaires à celle de Tranvouez (2001) ou Leitao (2008). Dans les deux cas, l'effort a été principalement concentré sur le développement de protocoles d'interaction (coopération, coordination, négociation) entre les agents au détriment de mécanismes spécifiquement dédiés à la gestion des perturbations.

Très peu d'architectures de pilotage distribué ont été spécialement conçues pour prendre en compte les problématiques relatives à la détection, à l'identification/diagnostic et au traitement de perturbations [Odrey et Mejia, 2003]. Les inconvénients potentiels des approches actuelles résident dans le manque de coordination entre les fonctions permettant le traitement des perturbations, la redondance de programmation, et le manque de spécialisation dans les méthodes de traitement des perturbations [Odrey et Mejia, 2003].

Enfin, nous avons constaté que les travaux qui considèrent des perturbations – que ces travaux soient en ordonnancement ou en pilotage distribué – ne sont pas assez génériques par rapport aux types de perturbations traités. Dans la plupart des cas, chaque système proposé ne traite qu'un type particulier de perturbation, le type le plus communément considéré étant les défaillances des ressources, et particulièrement les pannes machines. A notre connaissance, aucun de ces travaux ne permet d'offrir un cadre conceptuel intégré permettant de modéliser, de détecter, d'identifier, de réagir et de mémoriser les perturbations.

Ces dernières années, les chercheurs se sont intéressés à l'immunité biologique en tant que système naturellement capable de gérer les menaces qui guettent l'organisme hôte.

Ces chercheurs ont essayé de s'inspirer de ce système pour développer des applications qui héritent de ses caractéristiques attrayantes, telles que la mémoire immunitaire, l'adaptation et l'apprentissage, les aspects décentralisés et distribués de la réaction immunitaire, etc.

Dans le chapitre suivant, nous étudions plus en détail l'immunité biologique et les applications artificielles qui en sont inspirées. Ceci nous permettra de voir si un tel système naturel peut apporter des éléments de réponse aux limitations constatées dans les approches de pilotage en environnement perturbé existantes.

Chapitre 2 : Immunité biologique, immunité artificielle et application aux systèmes de production

RÉSUMÉ. L'immunité biologique est un système naturel capable de réagir et de s'adapter aux menaces biologiques qui guettent l'organisme hôte. Ce système a suscité l'intérêt d'une communauté croissante de chercheurs. Leurs travaux ont contribué à l'émergence de systèmes immunitaires artificiels (SIA) comme un nouveau paradigme de l'intelligence artificielle. L'objectif de ce chapitre est d'identifier les principes immunitaires biologiques les plus pertinents, et de présenter les applications qui s'en sont inspirées dans les systèmes de production. Ce chapitre va nous permettre de constater qu'il n'existe pas d'approche immunitaire consensuelle, et de remarquer que les SIA ont été appliqués à plusieurs domaines, sauf le pilotage de systèmes de production soumis à des perturbations. Nous déduisons que l'immunité biologique peut apporter plusieurs réponses intéressantes aux lacunes des approches de pilotage existantes en matière de prise en compte et traitement des perturbations. Toutes ces constatations nous permettent de définir notre problématique de recherche. Cette dernière consiste à envisager l'immunité biologique comme un support pouvant inspirer un cadre conceptuel intégré pour la prise en compte des perturbations dans les systèmes de production.

2.1. Introduction

L'immunité biologique est un système naturellement doté de mécanismes lui permettant de justifier d'un haut degré de réactivité et d'adaptabilité contre les menaces biologiques qui guettent l'organisme hôte. Les caractéristiques de ce système ont intéressé les chercheurs et les ont incités à les étudier pour en dériver des applications artificielles. Leurs efforts ont contribué à l'émergence de plusieurs systèmes immunitaires artificiels (SIA).

Le pilotage de systèmes de production a beaucoup à gagner de l'étude, non seulement des caractéristiques biologiques, mais aussi des applications qui en ont été inspirées. Ceci peut être d'une grande utilité pour le traitement des perturbations dans les systèmes de production.

Dans ce sens, il est judicieux de comprendre comment fonctionne l'immunité biologique, en termes d'architecture, d'acteurs, de concepts, de principes et de mécanismes mis en œuvre. Il est tout aussi utile d'examiner quelles applications académiques ou industrielles ont été proposées, particulièrement en ce qui concerne les systèmes de production. Ainsi, ce chapitre se propose de décrire le fonctionnement d'un système immunitaire biologique (SIB) et d'analyser la littérature scientifique existante afin d'étudier les applications qui en ont été faites.

Notre démarche consiste tout d'abord à décrire l'architecture, les acteurs, les principes et les mécanismes d'un système immunitaire biologique (SIB). Ensuite, nous introduisons les systèmes immunitaires artificiels (SIA) et nous montrons comment les concepts biologiques ont été utilisés dans des applications du monde académique et industriel en relation avec les systèmes de production. Enfin, nous proposons une critique de l'existant et nous dégagons une problématique de recherche.

2.2. Système immunitaire biologique

Le système immunitaire biologique est le mieux défini par son rôle, lequel consiste à protéger et à défendre l'organisme hôte contre les éléments qui lui sont nuisibles. Une présentation détaillée de l'immunité biologique peut être trouvée dans plusieurs livres de référence, tels que [Kubi, 2002]. L'immunologie est le domaine de la science qui étudie le système immunitaire biologique par l'investigation des mécanismes de défense de l'organisme contre les substances anormales ou étrangères.

Ces substances nuisibles sont nommées « *pathogènes* », car elles peuvent générer des « *pathologies* », c'est-à-dire des maladies. Les pathogènes peuvent avoir une origine aussi bien interne à l'organisme – provenant par exemple de tumeurs et de cellules cancéreuses – qu'externe, provenant par exemple de bactéries, de virus et de parasites.

S'ils ne sont pas stoppés et/ou éliminés, ces pathogènes prolifèrent dans l'organisme et génèrent des maladies nuisibles à son bon fonctionnement. Le système immunitaire est alors confronté aux problèmes de détection, d'identification et de réponse aux pathogènes. Suite à la détection de la présence d'éléments nuisibles dans l'organisme, l'étape d'identification ou reconnaissance [De Castro *et al.*, 2003] consiste à orienter la réaction immunitaire vers les mécanismes les plus appropriés pour déclencher une réponse immunitaire et ainsi éliminer ou stopper les effets indésirables du pathogène [De Castro *et al.*, 2003].

2.2.1. Mécanismes biologiques de détection

Les cellules du système immunitaire présentent à leur surface des récepteurs dits « *PRR* » (pour « *Pattern Recognition Receptors* »). Ces récepteurs sont capables d'identifier des portions (ou « *PAMP* », pour « *Pathogen Associated Molecular Pattern* ») présentes à la surface des pathogènes, des fragments (ou « *antigènes* ») de ces pathogènes ou des « *toxines* », qui sont des substances sécrétées par ces pathogènes [Hofmeyr, 2000]. Les PAMP, les antigènes ou les toxines représentent des empreintes permettant de détecter la présence d'un pathogène.

Plusieurs théories [Burnet, 1959, Jerne, 1974, Matzinger, 1998] ont été proposées afin d'expliquer comment est ce que le système immunitaire distingue les éléments (cellules, tissus, substances, molécules) qui appartiennent à l'organisme – le Soi – de ceux qui sont nuisibles à l'organisme – le Non Soi.

Selon la théorie de la discrimination Soi/Non Soi [Burnet, 1959, Goldsby *et al.*, 2000], la surface des cellules immunitaires est munie de récepteurs, dits « *PRR* » (pour « *Pattern Recognition Receptors* »), capables de détecter exclusivement le Non Soi, de se lier avec ses empreintes et de déclencher les mécanismes permettant de l'éliminer. Ainsi, la décision d'élimination du pathogène, ainsi que celle sur la manière avec laquelle ce dernier est éliminé reviennent aux cellules immunitaires [Greensmith *et al.*, 2004]. Par exemple, la Figure 2.1 illustre ce mécanisme par lequel une cellule immunitaire (lymphocyte B) est capable de détecter la présence d'un antigène.

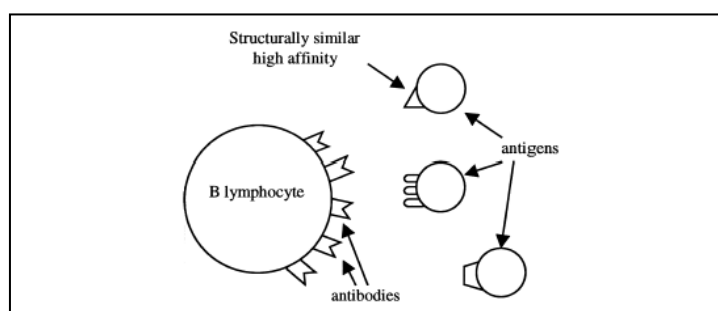


Figure 2.1: Mécanisme de détection structurale [De Castro et Timmis, 2002].

La théorie du danger [Matzinger, 1998] fournit une autre vision, selon laquelle la prise de décision revient non pas aux cellules immunitaires, mais plutôt aux cellules de l'organisme que le système immunitaire est sensé protéger [Greensmith *et al.*, 2004]. Selon cette théorie, les SIB sont capables de détecter et de réagir au danger, plutôt que de détecter ou de réagir au Non Soi. Les cellules agressées sont capables de guider la réponse immunitaire par la production de signaux de danger qu'elles émettent lorsqu'elles périssent de manière anormale [Aickelin *et al.*, 2002]. Ces signaux établissent un périmètre de danger autour de la cellule agressée, au sein duquel les cellules immunitaires qui réussissent à identifier le pathogène sont activées pour le capturer [Aickelin *et al.*, 2002].

Par ailleurs, certains virus sont capables d'échapper à la détection par leurs empreintes (PAMP, antigènes ou toxines) et ne se manifestent qu'après avoir infecté des cellules hôtes. Lorsqu'un tel virus envahit une cellule de l'organisme, il dérègle son fonctionnement [Goldsby *et al.*, 2000]. Les cellules infectées manifestent alors à leur surface des récepteurs

différents de ceux habituellement affichés [Hofmeyr, 2000], ou ne manifestent plus du tout de récepteurs [Twycross *et al.*, 2005]. Certaines cellules spécialisées (cellules NK et Tk) du système immunitaire sont capables de détecter ce changement dans le comportement des cellules infectées. Elles sont alors activées et procèdent à l'élimination des cellules infectées.

2.2.2. Mécanismes biologiques d'identification et de reconnaissance

Les SIB identifient les pathogènes moyennant deux sous-systèmes inter reliés : l'immunité innée (système immunitaire inné) et l'immunité acquise (système immunitaire adaptatif). Chacun de ces deux sous systèmes contribue différemment à la réponse immunitaire.

L'immunité adaptative est organisée autour de deux classes de cellules : les lymphocytes B et T, alors que l'immunité innée est organisée autour d'une plus grande variété de cellules telles que les cellules dendritiques, les macrophages et les cellules NK [De Castro *et al.*, 2002]. Les récepteurs à la surface des cellules du système immunitaire adaptatif sont très spécifiques à des (micro) caractéristiques distinctives d'un pathogène particulier (les antigènes). Les récepteurs à la surface des cellules de l'immunité innée sont plus génériques, sensibles à des (macro) caractéristiques plutôt générales (les « PAMP ») permettant de distinguer différentes classes entières de pathogènes [Twycross *et al.*, 2005].

L'immunité innée confère à l'organisme une première ligne de défense rapide permettant de maîtriser tôt l'infection. Les cellules de l'immunité innée sont capables d'identifier directement (par elles mêmes, i.e. sans l'aide d'autres cellules immunitaires) certains microorganismes. Elles sont alors activées et éliminent les intrus par différents moyens (opsonization, lysis, etc.) [Hofmeyr, 2000]. En parallèle, l'immunité innée initie et guide une réponse adaptative, plus lente à se déployer, afin de développer une réponse plus spécifique et mieux adaptée au pathogène [Twycross *et al.*, 2005]. Cette initiation est effectuée grâce à des mécanismes d'identification et de présentation antigénique.

En effet, certaines cellules de l'immunité innée – dites APC, telles que les macrophages – détectent le pathogène et le capturent. Ces cellules décomposent le pathogène détecté afin d'extraire ses antigènes et les présenter à la surface de la cellule. Ces antigènes stimulent les lymphocytes Th de l'immunité adaptative pour les identifier. Il incombe alors à ces lymphocytes Th de déterminer si l'antigène peut être toléré ou au contraire doit être classé nuisible et combattu [Hofmeyr, 2000]. Lorsqu'un antigène est reconnu nuisible, les lymphocytes Th jouent un rôle de médiation. Ils orientent la réponse adaptative en fonction de la virulence et des caractéristiques de l'antigène, en confirmant l'activation de cellules immunitaires effectrices (lymphocytes B ou Tk) ayant détecté l'antigène. La Figure 2.2 présente les acteurs d'une réponse immunitaire biologique et illustre les différentes interactions de stimulation et de co stimulation entre eux.

Par ailleurs, la théorie du réseau immunitaire [Jerne, 1974] stipule que les cellules immunitaires sont capables de se reconnaître et de s'éliminer mutuellement. En effet, des portions (appelées « idiotopes ») des récepteurs à la surface des cellules immunitaires peuvent être reconnues par d'autres cellules immunitaires, similairement à la manière avec laquelle un antigène serait reconnu par ces cellules. Cette théorie décrit le système immunitaire comme un réseau auto régulé de molécules et de cellules capables d'interagir, de se stimuler et de se supprimer, même en l'absence d'antigènes. Ces interactions de stimulation et de suppression

permettent de contrôler la prolifération et l'élimination des cellules dans ce réseau et de réguler la taille et la diversité du réseau de cellules immunitaires.

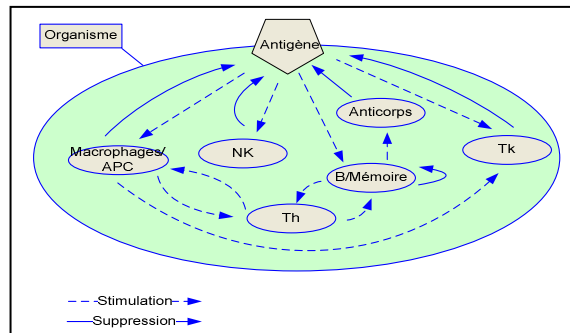


Figure 2.2. Coopération dans les systèmes immunitaires biologiques

2.2.3. Réponse immunitaire adaptative

Les principales caractéristiques d'une réponse immunitaire adaptative en présence d'un antigène sont décrites par le principe de sélection clonage [Burnet, 1959, Goldsby *et al.*, 2000]. Cette théorie stipule que seuls les lymphocytes B qui détectent l'antigène sont sélectionnés, prolifèrent, se différencient, et sécrètent des anticorps, molécules très spécifiques à l'antigène capables de le neutraliser et de faciliter son élimination par d'autres cellules immunitaires. Lorsqu'un lymphocyte B détecte un antigène, plus précisément, lorsque l'intensité de la liaison chimique entre les récepteurs à la surface du lymphocyte B et l'antigène excède un seuil d'activation ou seuil d'affinité, il est stimulé pour reproduire des clones (copies) de lui-même. En se formant, ces clones subissent un mécanisme de maturation de l'affinité [Hofmeyr, 2000] destiné à améliorer la capacité des lymphocytes B à détecter l'antigène. Ce mécanisme est mis en œuvre grâce à des mutations à la fois rapides, pour accélérer la réponse à l'antigène, et de haute fréquence pour améliorer la qualité de la liaison chimique avec l'antigène [Hofmeyr, 2000].

Une réponse immunitaire réussie conduit à la formation de cellules mémoires ayant une haute affinité avec l'antigène à l'origine de la réponse. Si des cellules mémoires issues d'une première réponse immunitaire sont confrontées de nouveau à un antigène connu, ou ayant une structure voisine de celle d'un antigène connu (principe d'immunisation), elles sont immédiatement activées et déclenchent une deuxième réponse immunitaire plus rapide et plus virulente que la première [Hofmeyr, 2000].

2.3. Systèmes immunitaires artificiels

L'immunité biologique représente une source riche d'inspiration pour les chercheurs de différents domaines. Ces chercheurs n'ont pas hésité à puiser dans cette source pour développer des applications artificielles destinées à résoudre des problèmes. Leurs travaux ont conduit à l'émergence d'une nouvelle discipline, celle des systèmes immunitaires artificiels.

La multitude d'applications et la diversité des approches artificielles inspirées de l'immunité biologique rend toute tentative pour définir ce que pourrait être « un » système immunitaire artificiel une tâche compliquée. De Castro et Timmis (2002) par exemple ne recensent pas

moins de trois définitions de la discipline des systèmes immunitaires artificiels, avant de donner leur propre définition, qui est la suivante :

« Les systèmes immunitaires artificiels sont des systèmes adaptatifs, inspirés de l'immunologie théorique et de l'observation des fonctions, des principes et des modèles immunitaires, et qui sont appliqués à la résolution de problèmes »

[De Castro et Timmis, 2002].

Il est important de souligner que dans cette définition, l'« *immunologie théorique* » réfère à tous les mécanismes, principes, modèles et théories, à la fois mathématiques et non mathématiques, utilisés pour décrire le fonctionnement du système immunitaire. À titre indicatif et non restrictif, ceci inclut les mécanismes de reconnaissance de formes, les réponses immunitaires innée et adaptative, les algorithmes de discrimination Soi/Non Soi, et les modèles de réseaux immunitaires.

De plus, il faut préciser que l'immunologie théorique a pour vocation de simuler, de compléter ou d'améliorer les analyses expérimentales du système immunitaire biologique alors que les systèmes immunitaires artificiels sont destinés à la résolution de problèmes dans différents domaines.

La définition formulée par De Castro et Timmis (2002) stipule par ailleurs qu'un système ne peut être qualifié d'immunitaire artificiel que :

- s'il comporte, au minimum, un modèle élémentaire d'un composant immunitaire (par exemple cellule, molécule, organe),
- s'il a été conçu en incorporant des idées inspirées de l'immunologie théorique ou expérimentale,
- s'il est destiné à la résolution de problèmes.

En conséquence, le seul fait d'attribuer une « *terminologie immunologique* » à un système donné n'est pas suffisant pour le qualifier d'immunitaire artificiel. Le système doit en plus incorporer un minimum de principes immunitaires, comme par exemple un modèle pour reconnaître des formes, un modèle de réseau immunitaire ou des algorithmes de sélection clonale ou négative.

Dans ce sens, De Castro et Timmis (2002) proposent un cadre (« *framework* ») pour l'ingénierie d'un système immunitaire artificiel. Ce cadre repose sur les éléments suivants :

- *une représentation pour les composants du système.* Cette représentation sert à créer des modèles des organes, cellules et molécules immunitaires.
- *un ensemble de mécanismes pour évaluer les interactions des composants avec l'environnement et entre eux.* L'environnement est généralement simulé par un ensemble de *stimuli* d'entrée. Les interactions sont quantifiées par une ou plusieurs fonctions, nommées « *fonctions d'affinité* ».
- *des procédures d'adaptation* qui gouvernent la dynamique du système, c'est-à-dire comment son comportement varie dans le temps.

Ainsi, la base de tout système est le domaine d'application. L'étude et la modélisation de ce domaine guident le choix de la représentation des composants du système. Une fois le choix d'une représentation convenable est fixé, une ou plusieurs mesures d'affinité sont utilisées

pour quantifier les interactions des éléments du système. Il existe une multitude de mesures d'affinité, lesquelles sont partiellement dépendantes des représentations adoptées. Enfin, le choix d'algorithmes ou de processus pour gouverner le comportement ou la dynamique du système clôture le processus de conception d'un système immunitaire artificiel.

Le choix d'un algorithme immunitaire traduit la décision du concepteur d'adopter tel ou tel mécanisme impliqué dans l'immunité naturelle pour le traduire en outil de résolution d'un problème donné. Il existe plusieurs algorithmes immunitaires différents qui s'appliquent à une variété de domaines divers mais qui traduisent tous l'un des mécanismes naturels déjà explicités en section 1.2.2. Dans la suite, on donne la version standard de ces algorithmes, plus particulièrement l'algorithme de sélection négative (« *Negative Selection Algorithm* »), l'algorithme de sélection clonage (« *Clonal Selection Algorithm* ») et l'algorithme du réseau immunitaire (« *Immune Network Algorithm* »).

2.3.1. Algorithme de sélection négative

Cet algorithme est la traduction de la capacité des systèmes immunitaires naturels à différencier le « *Soi* » du « *Non Soi* » (« *Self/Non self discrimination* »). Il sert à détecter des changements ou des variations dans un ensemble initialement défini.

A supposer que l'ensemble des éléments du « *Soi* » soit connu, l'algorithme standard de sélection négative a pour rôle de générer un ensemble de cellules immunitaires, appelées « *détecteurs* », capables de reconnaître toute autre cellule sauf celles appartenant à l'ensemble du « *Soi* ». Cet algorithme est résumé [Figure 2.3 \[De Castro, 2002\]](#).

1. **Initialisation** : Générer aléatoirement un ensemble de détecteurs candidats
2. **Censure** : Tant que le nombre de détecteurs est insuffisant,

Faire

Evaluation d'affinité : calculer l'affinité entre chaque élément du « soi » et un détecteur candidat

Sélection : éliminer tout détecteur qui reconnaît un élément du « soi ».

Autrement, incrémenter le nombre de détecteurs valides.

Fin Faire

3. **Pilotage** : piloter un nouvel ensemble de « soi » pour détecter des variations : Si un détecteur de l'ensemble des détecteurs ainsi générés identifie un élément parmi le nouvel ensemble de « soi », alors cela signifie qu'une variation a été détectée.

Figure 2.3 : Algorithme Sélection Négative [\[De Castro, 2002\]](#).

2.3.2. Algorithme de sélection clonage

Cet algorithme est la traduction de la capacité des systèmes immunitaires naturels à monter une réponse immunitaire capable d'éliminer les pathogènes. Etant donnée une représentation des antigènes, et une représentation des cellules immunitaires, cet algorithme sert à optimiser l'affinité des cellules immunitaires aux antigènes.

L'algorithme standard de sélection clonage génère et reproduit un ensemble de cellules immunitaires, appelées anticorps (ou lymphocytes), capables de reconnaître les éléments de l'ensemble des antigènes. Les cellules capables de reconnaître des antigènes se reproduisent asexuellement (clonage) et proportionnellement à leur degré d'affinité avec les antigènes. Durant la phase de clonage, les cellules immunitaires subissent une mutation leur permettant d'augmenter leur affinité avec les antigènes (processus de maturation d'affinité). Le taux de mutation est inversement proportionnel à l'affinité de la cellule immunitaire avec l'antigène reconnu. Cet algorithme est résumé [Figure 2.4 \[De Castro, 2002\]](#).

1. **Initialisation** : Générer aléatoirement un répertoire de cellules immunitaires
2. **Sélection clonage** : **Pour** chaque antigène,

Faire

Mesure d'affinité : calculer l'affinité entre chaque cellule immunitaire et l'antigène
Sélection : sélectionner les cellules de plus grande affinité
Reproduction et mutation : cloner les cellules immunitaires sélectionnées proportionnellement à leur affinité avec l'antigène. Muter chaque clone avec un taux de mutation inversement proportionnel à leur degré d'affinité

Fin Faire
3. **Cycle** :

Répéter

Sélection Clonage

jusqu'à critère de convergence (d'arrêt)

Figure 2.4 : Algorithme Sélection Clonage [\[De Castro, 2002\]](#).

2.3.3. Algorithme du réseau immunitaire

D'après la théorie du réseau immunitaire, les cellules immunitaires peuvent identifier et être identifiées par d'autres cellules immunitaires. Lorsqu'une cellule immunitaire identifie un

antigène ou une autre cellule immunitaire, elle est stimulée. Par ailleurs, lorsqu'une cellule immunitaire est identifiée par une autre cellule immunitaire, elle est supprimée.

L'algorithme du réseau immunitaire reflète cette dynamique des cellules immunitaires biologiques. Il peut être utilisé pour optimiser l'affinité des cellules immunitaires aux antigènes, et/ou pour des fins de classification.

Soient :

N_{st} : taux de stimulation par le réseau

N_{sup} : taux de suppression par le réseau

A_{st} : taux de stimulation par l'antigène

Alors l'équation (1.1) décrit le niveau de stimulation S d'une cellule du réseau immunitaire [De Castro, 2002].

$$S = N_{st} - N_{sup} + A_{st} \quad (1.1)$$

Le niveau de stimulation d'une cellule immunitaire détermine ses probabilités de reproduction et de mutation. La Figure 2.5 fournit le schéma général d'un algorithme standard du réseau immunitaire.

1. **Initialisation** : Initialiser un réseau de cellules immunitaires
2. **Pour** chaque antigène,

Faire

Méta dynamique : introduire de nouvelles cellules dans le réseau et éliminer les cellules inutiles (selon un certain critère)

Identification antigénique : confronter les cellules immunitaires à l'antigène

Interactions du réseau : confronter les cellules immunitaires entre elles

Niveau de stimulation : calculer le niveau de stimulation de chaque cellule immunitaire (équation 1.1)

Dynamique : mettre à jour la structure du réseau en fonction des niveaux de stimulation : propager les cellules qui ont les plus grandes affinités et éliminer les cellules qui ont les plus faibles affinités.

Fin Faire

3. **Cycle** :

Répéter

Etape 2

jusqu'à critère de convergence (d'arrêt)

Figure 2.5 : Algorithme du réseau immunitaire [De Castro, 2002].

2.4. Applications immunitaires artificielles dédiées aux systèmes de production

Les mécanismes immunitaires biologiques ont inspiré le développement de systèmes immunitaires artificiels (SIA) dans plusieurs domaines relatifs aux systèmes de production, notamment la détection d'anomalies, le diagnostic d'erreurs, la planification et l'ordonnancement. Ces applications sont passées en revue dans les sections suivantes.

2.4.1. Détection d'anomalies

Le comportement normal d'un système peut souvent être caractérisé par une série d'observations dans le temps. En examinant ces observations, le problème de la détection d'anomalies peut être décrit comme celui de la découverte de déviations par rapport à une

référence, d'un comportement caractéristique ou d'une propriété du système [De Castro et Timmis, 2002].

Dasgupta et Forrest (1996) ont utilisé différentes séries temporelles pour analyser la performance de l'algorithme de sélection négative dans la détection d'anomalies dans ces données. L'objectif de leur travail est de développer un algorithme efficace qui peut détecter les changements de caractéristiques d'un système ou d'un processus en régime permanent.

Dans ces travaux, la notion de « *Soi* » correspond à des modèles de comportement normal du système considéré. La notion de « *Non Soi* » correspond aux anomalies, lesquelles sont des déviations qui excèdent des variations tolérées dans les données observées. En se basant sur un nombre suffisant d'échantillons de données sur le comportement normal du système, l'algorithme génère un ensemble diversifié de détecteurs. Ces détecteurs sont ensuite utilisés pour signaler les changements dans de nouvelles séries temporelles acquises depuis le système piloté. Ces changements sont détectés de manière probabiliste, sans utiliser de modèle de connaissance préalable sur les anomalies.

Dasgupta et Forrest (1999) ont appliqué leur approche à la détection de bris d'outils lors d'opérations de fraisage. Les changements détectés sont signalés à l'opérateur chargé de la machine. L'approche des auteurs n'a pas pour vocation d'identifier les causes des changements détectés.

2.4.2. Diagnostic d'erreurs

Le diagnostic d'erreurs (« *Fault diagnosis* ») correspond à l'identification de la nature et des causes d'une erreur dès la détection de ses symptômes. La détermination des composants à l'origine de ces symptômes permet de prévenir l'occurrence des erreurs et d'éviter leur propagation dans tout le système.

Ishida (1997) s'est inspiré de la théorie du réseau immunitaire pour proposer un système distribué de diagnostic actif. Le système met en jeu un ensemble d'agents associés à des capteurs. Ces agents correspondent à des cellules B et forment un ensemble auto organisé d'unités reliées entre elles et capables de se tester mutuellement. Ce test mutuel permet à une unité de déterminer si l'unité voisine est défaillante ou non.

La liaison entre deux unités est pondérée par un coefficient qui est fonction de la fiabilité de la mesure donnée par chaque capteur. Ces pondérations sont utilisées dans une équation dynamique qui gouverne le comportement du réseau immunitaire. La mémoire correspond à des points d'équilibre stable dans la dynamique de ce réseau. Le diagnostic est obtenu en déterminant ces points d'équilibre stable après une période de perturbation du réseau de capteurs.

Kayama et al. (1995) se sont intéressés à la prévention de la propagation d'erreurs dans un atelier de production et ce par la détermination des parties défaillantes lorsque des erreurs se produisent. Ils ont hybridé le réseau immunitaire proposé par Ishida (1997), brièvement décrit ci haut, avec une stratégie LVQ (« *Linear Vector Quantization* ») pour détecter des valeurs anormales de capteurs dans un système de production.

Les auteurs proposent un système qui a deux modes d'exécution : apprentissage et diagnostic. En mode apprentissage, la stratégie LVQ est utilisée pour établir des corrélations entre les

mesures données par les capteurs. En mode diagnostic, le réseau immunitaire utilise ces corrélations pour déterminer les capteurs défaillants.

Les diagnostics établis par les approches d'Ishida (1997) et de Kayama et al. (1995) donnent l'ensemble des capteurs défaillants nécessitant une intervention de maintenance, mais ne permettent ni d'identifier la nature ou la cause de la défaillance, ni de lui suggérer un traitement spécifique.

Bradley et Tyrrell (2000) ont proposé d'utiliser l'algorithme de sélection négative pour générer un système tolérant aux fautes. Leur approche est basée sur une machine à états finis où les états et les transitions valides représentent le *Soi*, et les états et les transitions invalides correspondent au *Non Soi*, ou antigènes. Les auteurs ont adopté un codage binaire pour représenter les états du système. Ils ont fait l'hypothèse que les erreurs ou fautes du système peuvent être détectées en utilisant des règles de vérification partielle des représentations des états valide et réel du système. Si des erreurs sont détectées, des signaux de co stimulation peuvent être utilisés pour activer des réactions prédéfinies.

2.4.3. Planification et ordonnancement

Les systèmes immunitaires artificiels ont été appliqués à plusieurs problèmes d'ordonnancement, à la fois mono objectifs et multi objectifs.

Parmi les premières tentatives pour appliquer les AIS aux problèmes d'ordonnancement et d'affectation, on retrouve les travaux de Fukuda *et al.* (1993) et de Mori *et al.* (1994a, 1994b, 1998). Dans ces travaux, les antigènes sont considérés comme des données d'entrée décrivant le problème d'ordonnancement, comme par exemple les quantités d'ordres, les taux de chargement ciblés des ressources et les charges maximales. Les anticorps sont considérés comme des solutions possibles du problème d'ordonnancement. L'algorithme est basé sur un modèle de réseau immunitaire et sur des mécanismes de reproduction génétique. Le modèle de réseau immunitaire est utilisé pour contrôler la production d'anticorps, alors que les mécanismes de reproduction génétique (opérateurs de croisement et de mutation) sont utilisés pour générer et diversifier une population d'anticorps. Une mesure d'affinité idiotopique est utilisée pour quantifier le degré de similarité entre deux anticorps représentatifs de deux ordonnancements possibles. Cette mesure d'affinité sert à contrôler la concentration et la variété des anticorps de la population.

L'idée de Mori *et al.* (1994a, 1994b, 1998), qui consiste à utiliser les interactions du réseau immunitaire pour contrôler les densités d'anticorps, a été reprise par Jeemin *et al.* (2000) pour adresser les problèmes de planification de lignes d'assemblage de circuits imprimés (« *printed circuit board assembly planning* ») et par Gwo *et al.* (2004, 2006) pour ordonnancer des commutations dans des centrales électriques (« *short term power generating unit commitment scheduling problems* »).

Hart *et al.* (1998) ont adressé un problème d'ordonnancement d'un atelier de type « *job shop* ». Dans leur approche, un anticorps représente un ordonnancement possible, codé sous la forme d'un vecteur de nombres entiers (permutation avec répétition, [Takeshi et Ryohei, 1997]). Les nombres entiers représentent les références des tâches à ordonnancer. Un antigène représente un ensemble de changements qui peuvent avoir lieu. Plus précisément, un antigène représente un ensemble de dates d'arrivées prévues pour les travaux à ordonnancer dans l'atelier. Ces dates varient d'un antigène à l'autre. L'approche est basée sur un algorithme en

deux étapes. Dans la première étape, un algorithme génétique est utilisé pour construire et optimiser une population de librairies. Ensuite, dans la deuxième étape, la meilleure librairie trouvée est utilisée pour générer une population d'anticorps en utilisant l'algorithme de sélection clonage. Chaque anticorps généré est confronté à plusieurs antigènes et évalué en fonction de son aptitude à éliminer cet ensemble d'antigènes. Le meilleur anticorps généré correspond à la solution du problème d'ordonnancement.

Plus tard, Hart et Ross (1999) ont conçu un algorithme en deux étapes pour adresser un problème d'ordonnancement à une machine. Dans la première étape, un algorithme génétique est utilisé pour détecter des séquences communes dans les ordonnancements fréquemment appliqués à la machine. Ces ordonnancements fréquemment appliqués à la machine sont considérés comme des antigènes, alors que les séquences communes sont considérées comme des anticorps. Dans la deuxième étape de l'algorithme, les anticorps sont utilisés comme des blocs de construction combinés pour produire de nouveaux ordonnancements.

Russ *et al.* (1999) et King *et al.* (2001) ont développé une approche AIS pour l'affectation de tâches et l'optimisation des performances de ressources informatiques mises en réseau. Les antigènes correspondent à des vecteurs d'informations collectées en temps réel. Ces informations correspondent à des données sur la performance des ressources matérielles et logicielles pilotées, comme par exemple la disponibilité des mémoires, l'utilisation des unités centrales de traitement (CPU), la charge des disques durs, etc. Les anticorps correspondent à des agents intelligents de contrôle. Ces agents sont de deux types : les agents cellules H (pour « *hardware* ») qui pilotent les ressources matérielles, et les agents cellules S (pour « *software* ») qui pilotent les ressources logicielles. Chaque agent anticorps essaye d'améliorer les performances du système en utilisant une méthode adaptative basée sur un arbre de décision à trois niveaux. Cet arbre de décision sert à classer les antigènes et à déterminer les actions les mieux appropriées en fonction de cette classification.

Carlos *et al.* (2003, 2004) ont développé un algorithme de sélection clonage pour résoudre un problème d'ordonnancement d'un atelier de type « *job shop* ». Les auteurs considèrent les solutions candidates comme des anticorps, codés sous la forme de vecteurs de nombres entiers (permutation avec répétition, [Takeshi et Ryohei, 1997]). Les nombres entiers représentent les références des tâches à ordonnancer. Chaque meilleure solution trouvée pendant la recherche est considérée comme un antigène qui est mémorisé comme référence. De plus, un deuxième anticorps, représentant une solution moins performante, est mémorisé comme un deuxième antigène. Les auteurs mentionnent que les antigènes servent à aider l'algorithme à échapper aux minima locaux sans donner plus de précisions.

Dans bon nombre de travaux, tels que (Jeemin *et al.*, 2000, Cui *et al.*, 2001, Costa *et al.*, 2002, Engin et Döyen, 2004, Chan *et al.*, 2005, Gwo *et al.*, 2004, 2006, Kumar *et al.*, 2006, Zandieh *et al.*, 2006) par exemple, la définition exacte des antigènes n'apparaît pas clairement. Dans ces travaux, les antigènes sont souvent reliés aux fonctions objectifs du problème. Les anticorps réfèrent, quant à eux, aux solutions candidates (ordonnements possibles) qui sont souvent codées sous forme de vecteurs réels ou entiers correspondant aux permutations des numéros de jobs. Les affinités entre anticorps et antigènes quantifient habituellement la qualité de la solution en termes de fonctions objectifs et de respect des contraintes du problème. Les affinités idiotopiques (entre anticorps) quantifient la diversité de la population d'anticorps en vue d'échapper aux minima locaux et d'éviter une convergence rapide.

Cui *et al.*, (2001) ont adressé un problème d'ordonnancement d'un atelier de type «*flow shop*» à deux objectifs. Leur approche est basée sur les interactions d'un réseau immunitaire et sur un algorithme évolutionniste multi objectif. Les interactions du réseau immunitaire sont utilisées pour déterminer des concentrations d'anticorps. Ces concentrations sont calculées en se basant sur les similarités entre chaque anticorps et le reste de la population. Ces concentrations sont ensuite utilisées dans l'évaluation de la fonction «*fitness*» et entrent dans la préservation de la diversité de la population d'anticorps sur laquelle agit l'algorithme évolutionniste.

Chan *et al.* (2005), ainsi que Zandieh *et al.* (2006) ont proposé des approches basées sur les interactions de réseaux immunitaires et sur des mécanismes de reproduction génétique pour adresser respectivement un problème d'affectation et d'ordonnancement dans un système manufacturier flexible et un problème de «*flow shop*» hybride qui tient compte des temps de changements d'outillages. Les interactions de réseaux immunitaires interviennent dans le mécanisme de sélection pour empêcher les solutions candidates de bonne qualité de dominer la population de solutions.

Le **Tableau 2** résume les applications existantes que nous avons identifiées dans la littérature [Darmoul *et al.*, 2006].

Tableau 2: applications des SIA en ordonnancement mono et multi objectifs.

Optimisation	Problème	Références	Objectif(s)
Mono objectif	Atelier à une machine	[Hart et Ross, 1999]	(1)
	Flow shop hybride	[Engin et Döyen, 2004, Zandieh <i>et al.</i> , 2006]	(2)
	Processeurs parallèles identiques	[Costa <i>et al.</i> , 2002]	
	Flow shop continu (no wait)	[Kumar <i>et al.</i> , 2006]	(3)
	Affectation de tâches, équilibrage de charge	[Hart <i>et al.</i> , 1998]	(1)
		[Carlos <i>et al.</i> , 2003, 2004]	(2)
		[Jeemin <i>et al.</i> , 2000]	(4)
		[Fukuda <i>et al.</i> , 1993, Mori <i>et al.</i> , 1994a, 1994b, Russ <i>et al.</i> , 1999, King <i>et al.</i> , 2001]	(5)
Multi objectif		[Gwo <i>et al.</i> , 2004, 2006]	(6)
	Flexible manufacturing systems FMS	[Chan <i>et al.</i> , 2005]	(7)
	Flow shop	[Cui <i>et al.</i> , 2001]	(8)
	Job shop	[Mori <i>et al.</i> , 1998]	(9)

- (1) Minimiser le retard maximal (T_{max})
- (2) Minimiser le *makespan* (C_{max})
- (3) Minimiser le *total flow time*
- (4) Minimiser le temps total d'assemblage d'un circuit imprimé (*total printed circuit board (PCB) assembly time*)
- (5) Equilibrage de charge
- (6) Minimiser coût opérationnel total (*total operational cost*)
- (7) Minimiser le coût total d'utilisation des machines, de manutention et de changement d'outillages
- (8) Minimiser le *makespan* (C_{max}) et le retard (*lateness* (L_{max}))
- (9) Minimiser la somme pondérée des temps de changements d'outillages, des temps d'attentes, et du *makespan* (C_{max})

Dans le **Tableau 3**, nous synthétisons les principales caractéristiques des approches AIS existantes pour l'ordonnancement.

Tableau 3: différentes mises en oeuvre d'approches immunitaires pour l'ordonnancement.

Caractéristique biologique	Equivalent artificiel	Exemples
Antigène	Données statiques d'entrée du problème d'optimisation	Contraintes de précédence, limites inférieure et supérieure de charge des ressources, dates d'arrivée et d'échéance des travaux, quantités d'ordres [Fukuda <i>et al.</i> , 1993 ; Mori <i>et al.</i> , 1994a, 1994b ; Hart <i>et al.</i> , 1998 ; Mori <i>et al.</i> , 1998]
	Mesures acquises dynamiquement et en temps réel	Disponibilité des mémoires, utilisation des unités centrales de traitement (CPU), charge des disques durs dans les systèmes informatiques en réseau [Russ <i>et al.</i> , 1999 ; King <i>et al.</i> , 2001]
	Ordonnancements fréquemment appliqués à une machine. [Hart et Ross, 1999]	
	Non mentionné explicitement (mais utilisé dans l'évaluation de l'affinité entre anticorps et antigène) [Jeemin <i>et al.</i> , 2000 ; Cui <i>et al.</i> , 2001 ; Costa <i>et al.</i> , 2002 ; Engin et Döyen, 2004 ; Gwo <i>et al.</i> , 2004 ; Chan <i>et al.</i> , 2005 ; Gwo <i>et al.</i> , 2006 ; Kumar <i>et al.</i> , 2006 ; Zandieh <i>et al.</i> , 2006]	
Anticorps	Solution candidate (ordonnancement possible)	Solution codée comme un vecteur de nombres entiers représentant les numéros de jobs. Codage en permutation avec répétition [Takeshi et Ryohei, 1997]. [Fukuda <i>et al.</i> , 1993 ; Mori <i>et al.</i> , 1994a, 1994b ; Hart <i>et al.</i> , 1998 ; Mori <i>et al.</i> , 1998 ; Jeemin <i>et al.</i> , 2000 ; Cui <i>et al.</i> , 2001 ; Costa <i>et al.</i> , 2002 ; Carlos <i>et al.</i> , 2003, 2004 ; Engin et Döyen, 2004 ; Gwo <i>et al.</i> , 2004 ; Chan <i>et al.</i> , 2005 ; Gwo <i>et al.</i> , 2006 ; Kumar <i>et al.</i> , 2006 ; Zandieh <i>et al.</i> , 2006]
	Agents Intelligents de contrôle	Agents cellules H (pour « <i>hardware</i> ») Agents cellules S (pour « <i>software</i> ») dans les systèmes informatiques en réseau [Russ <i>et al.</i> , 1999 ; King <i>et al.</i> , 2001]
	Séquences détectées communes à plusieurs ordonnancements [Hart et Ross, 1999]	
Affinité Ab – Ag	Evaluation de fonctions objectifs [Fukuda <i>et al.</i> , 1993 ; Mori <i>et al.</i> , 1994a, 1994b ; Hart <i>et al.</i> , 1998 ; Mori <i>et al.</i> , 1998 ; Jeemin <i>et al.</i> , 2000 ; Cui <i>et al.</i> , 2001 ; Costa <i>et al.</i> , 2002 ; Carlos <i>et al.</i> , 2003, 2004 ; Engin et Döyen, 2004 ; Gwo <i>et al.</i> , 2004 ; Chan <i>et al.</i> , 2005 ; Gwo <i>et al.</i> , 2006 ; Kumar <i>et al.</i> , 2006 ; Zandieh <i>et al.</i> , 2006]	
	Similarité entre anticorps et antigène (entropie d'information) [Hart et Ross, 1999 ; Russ <i>et al.</i> , 1999 ; King <i>et al.</i> , 2001]	
Affinité Ab – Ab	Similarité entre anticorps (entropie d'information) [Fukuda <i>et al.</i> , 1993 ; Mori <i>et al.</i> , 1994a, 1994b ; Mori <i>et al.</i> , 1998 ; Cui <i>et al.</i> , 2001 ; Gwo <i>et al.</i> , 2004 ; Chan <i>et al.</i> , 2005 ; Gwo <i>et al.</i> , 2006 ; Zandieh <i>et al.</i> , 2006]	

Le **Tableau 3** nous montre qu'il n'existe pas d'implémentation consensuelle pour chacune des caractéristiques et composants immunitaires impliqués dans la conception d'un AIS. Par conséquent, il apparaît difficile de déduire un algorithme consensuel ou une vue unifiée de ce que l'on pourrait appeler « un » système immunitaire artificiel pour l'ordonnancement.

Néanmoins, l'analyse des travaux existants peut nous amener à proposer l'algorithme de la **Figure 2.6** comme tentative pour décrire l'architecture générale sur la base de laquelle les approches AIS existantes sont développées.

1. **Initialisation** : générer une population initiale de cellules immunitaires
2. **Reconnaissance antigénique**
3. **Réponse immunitaire**
4. **Répéter** étapes 2 et 3 **jusqu'à** réalisation d'un critère d'arrêt.

Figure 2.6 : Architecture générale d'un algorithme AIS pour l'ordonnancement.

Dans l'étape 1, une population initiale de cellules immunitaires (anticorps ou cellules B) est générée soit de manière aléatoire, soit de manière heuristique. Dans l'étape 2, des interactions avec l'environnement ont lieu à travers la confrontation des cellules immunitaires générées avec les antigènes. Dans cette étape, l'affinité entre cellules immunitaires et antigènes est calculée. Habituellement, cette étape correspond à l'évaluation de la qualité des solutions représentées par les cellules immunitaires en termes de fonctions objectifs. Dans l'étape 3, une réponse immunitaire a lieu durant laquelle la structure de la population de cellules immunitaires est mise à jour par la création de nouvelles cellules et l'élimination des cellules les moins performantes. L'étape 4 définit le critère d'arrêt.

L'algorithme de la Figure 2.6 est très similaire à l'architecture d'un algorithme évolutionniste. Il semblerait même que la plupart des algorithmes immunitaires développés pour l'ordonnancement reposent essentiellement sur des mécanismes évolutionnistes [De Castro et Timmis, 2002]. En fait, les mécanismes de production et d'adaptation des cellules immunitaires, qui sont évolutionnistes par nature [Timmis *et al.*, 2002], semblent être les mécanismes les plus attrayants aux chercheurs, puisqu'ils expliquent la capacité de l'immunité biologique à développer une réponse immunitaire performante. Pourtant, plusieurs travaux essaient d'argumenter que les systèmes immunitaires artificiels basés sur des algorithmes de sélection clonage ou de réseaux immunitaires sont des approches bien distinctes des algorithmes évolutionnistes [De Castro et Timmis, 2002, De Castro et Von Zuben, 2002, Garrett, 2005].

De plus, les implémentations des algorithmes de sélection clonage et de réseau immunitaire présentent plusieurs similarités. En fait, dans son papier soulevant la question « *comment évaluer les systèmes immunitaires artificiels ?* », Garrett (2005) suggère que peut être dans un futur proche, l'algorithme de sélection clonage pourrait être classé comme une forme de réseau immunitaire. Cette suggestion a le mérite d'admettre et de refléter les similarités d'implémentation des deux types d'algorithmes, bien que les deux implémentations artificielles reposent sur des fondements biologiques différents.

2.5. Discussion

Dans cette section, nous commençons par synthétiser la bibliographie sur l'immunité biologique et les différents systèmes immunitaires artificiels. Ensuite, nous faisons le lien avec le chapitre précédent, ce qui nous permet de dégager notre problématique de recherche.

2.5.1. Synthèse bibliographique

L'analyse de la littérature nous révèle que l'immunité biologique a inspiré différents domaines d'application dans les systèmes de production. Cependant, plusieurs constats peuvent être formulés.

D'abord, d'une discipline à l'autre, et même au sein d'une même discipline, nous constatons qu'il n'existe pas d'implémentation consensuelle pour chacune des caractéristiques et composants immunitaires impliqués dans la conception d'un SIA. La disparité des approches immunitaires existantes fait que nous ne sommes pas parvenus à identifier une proposition consensuelle de ce que pourrait être « *un* » système immunitaire artificiel.

En effet, d'une part l'immunité biologique offre une richesse de concepts, de principes et de mécanismes telle, qu'il suffit d'adopter un de ces principes pour que l'approche proposée soit qualifiée d'immunitaire. D'autre part, peu de travaux exploitent l'immunité biologique en tant que système intégré, un système dont les acteurs déploient plusieurs principes au service d'un objectif commun.

Cette remarque est particulièrement vraie en ce qui concerne les travaux en ordonnancement. Dans ce domaine, les algorithmes immunitaires proposés partagent beaucoup de points communs avec des approches de type évolutionniste [darmoul *et al.*, 2006]. Dans ces travaux, ce sont les capacités d'optimisation combinatoire du système immunitaire qui ont le plus intéressé les chercheurs, au détriment d'autres concepts et principes que nous jugeons très pertinents et prometteurs pour le pilotage de systèmes de production en environnement perturbé. D'ailleurs, à notre connaissance, ce domaine particulier n'a pas encore été adressé par des approches immunitaires artificielles.

Dans cette perspective, la théorie biologique introduite au début de ce chapitre montre que la protection conférée à l'organisme résulte de l'effet mutuel et combiné de l'interaction entre deux sous systèmes immunitaires intégrés : l'immunité innée et l'immunité adaptative. Ce système intégré offre plusieurs caractéristiques intéressantes du point de vue du pilotage des systèmes de production.

Par exemple, ce système est capable de gérer une grande variété de menaces et de se rappeler les rencontres précédentes avec des éléments malignes, ce qui lui permet de les éliminer plus rapidement et plus efficacement. Ces fonctionnalités sont réalisées de manière décentralisée, c'est-à-dire indépendante d'un organe central de commande, et distribuée sur plusieurs types d'acteurs biologiques. Plusieurs autres caractéristiques intéressantes sont résumées dans le [Tableau 4](#).

Tableau 4: Principales caractéristiques d'un système immunitaire naturel.

Caractéristique	Description
Distribution	Le système immunitaire est un système intrinsèquement distribué à travers plusieurs cellules et organes de l'organisme.
Décentralisation et auto régulation	Il n'existe pas d'organe central pour coordonner la réponse immunitaire. Par conséquent, les mécanismes immunitaires sont auto – régulés.
Extraction de caractéristiques	Les cellules de l'immunité innée (cellules APC) filtrent les caractéristiques (antigènes) des pathogènes et les présentent à leur surface.
Détection probabiliste	La détection des antigènes est approximative. Ainsi une cellule immunitaire peut reconnaître plusieurs types différents d'antigènes partageant une structure similaire.
Identification et reconnaissance	Le système immunitaire peut reconnaître et classer différents antigènes et générer des réponses sélectives.
Réponse immunitaire	Le système immunitaire utilise un mécanisme combinatoire pour améliorer ses aptitudes à reconnaître très spécifiquement les pathogènes.
Protection dynamique	Les processus de l'immunité adaptative gouvernant la génération de nouvelles cellules immunitaires de haute affinité, équilibre entre exploration et exploitation.
Activation sur seuil	la prolifération de cellules immunitaires pendant la réponse immunitaire a lieu seulement si les cellules immunitaires sont stimulées au-delà d'un seuil d'activation qui est fonction du niveau de reconnaissance de l'antigène.
Apprentissage	Le système immunitaire apprend par l'expérience la structure spécifique des antigènes suite à ses premières rencontres avec eux.
Mémoire immunitaire	Le système immunitaire conserve une mémoire de ses rencontres passées avec les antigènes. Cette mémoire sert à accélérer la réponse face à un antigène déjà rencontré.
Théorie du danger	Le système immunitaire a une sensibilité au danger et peut distinguer entre le soi et le non soi. Il peut tolérer le non soi bénin, et il peut combattre le soi nuisible.
Sélection négative	Le système immunitaire élimine les cellules immunitaires nuisibles au soi.

2.5.2. Problématique

La mise en correspondance de la synthèse bibliographique pour ce chapitre et des conclusions du chapitre précédent soutient l'affirmation que l'immunité biologique recèle un potentiel intéressant pour le pilotage des systèmes de production en environnement perturbé.

En effet, l'examen des efforts entrepris dans la littérature sur le pilotage nous a révélé le manque de fonctions spécifiquement dédiées à la gestion des perturbations, que ce soit dans

les systèmes d'information type MES, ou dans les approches de pilotage des systèmes de production. Or l'immunité biologique intègre des mécanismes spécialisés de détection, d'identification et de réaction aux menaces qui guettent l'organisme.

Les inconvénients potentiels des travaux sur le pilotage qui envisagent une prise en compte des perturbations résident dans le manque de distribution des fonctions de gestion des perturbations, et le manque de coordination entre elles. A ce juste titre, l'immunité biologique repose sur une architecture complètement distribuée. Elle fait intervenir différents types de cellules immunitaires. Chaque type est doté de fonctions spécialisées de traitement des perturbations. Toutes les cellules immunitaires sont capables de coordonner leurs actions en vue de réussir une réponse immunitaire dirigée contre les éléments qui menacent l'organisme.

L'analyse des travaux sur le pilotage révèle qu'ils proposent des mécanismes qui ne sont pas assez génériques par rapport aux types de perturbations traités. Or l'immunité biologique est capable de prendre en compte une grande variété de menaces.

Les travaux existants sur le pilotage n'exploitent que des décisions de pilotage restreintes à l'affectation / réaffectation et séquençement d'opérations sur les ressources, alors que l'immunité biologique est capable de mettre en jeu plusieurs types de cellules pour agir contre une menace, et même de développer de nouvelles cellules pour s'adapter aux nouvelles menaces.

Toutes ces constatations stimulent notre intérêt pour dériver de l'immunité biologique des concepts et des mécanismes utiles pour le pilotage de systèmes de production soumis à des perturbations. Nous pensons que l'immunité biologique peut fournir un cadre conceptuel intégré pour la prise en compte des perturbations dans les systèmes de production. Notre problématique consiste alors à déterminer les contributions de l'immunité biologique en pilotage en vue de spécifier un système immunitaire artificiel doté de mécanismes spécifiquement dédiés à la gestion des perturbations. Nous souhaitons que ces mécanismes soient assez génériques pour permettre de traiter une grande variété de perturbations.

2.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le fonctionnement de l'immunité biologique, en termes d'architecture, d'acteurs, de concepts, de principes et de mécanismes. Nous avons aussi étudié les applications existantes qui en ont été dérivées.

Cette étude nous a permis de constater qu'il n'y a pas encore eu de travaux basés sur l'immunité biologique, qui ont considéré le problème du pilotage de systèmes de production soumis à des perturbations. Nous avons aussi pu constater qu'il n'existe pas de proposition consensuelle de ce que pourrait être *une* approche ou *un* algorithme immunitaire artificiel. Nous avons enfin pu remarquer que l'immunité biologique peut inspirer des réponses à plusieurs des lacunes constatées dans notre premier chapitre consacré à l'étude des approches de pilotage et de traitement des perturbations.

Toutes ces remarques nous ont permis de définir notre problématique. Cette dernière consiste à s'inspirer de l'immunité biologique pour développer un cadre conceptuel intégré pour la prise en compte des perturbations dans les systèmes de production.

Notre démarche pour résoudre cette problématique repose sur deux étapes. La première étape consiste à explorer, dans le chapitre suivant, les contributions potentielles de l'immunité biologique dans le domaine du pilotage de systèmes de production soumis à des perturbations. Cette exploration se veut aussi exhaustive que possible en termes d'architecture et de mécanismes.

La détermination du potentiel de l'immunité biologique est de nature à mieux éclairer la deuxième étape de notre démarche, étape que nous détaillons dans le [chapitre 4](#). Dans ce chapitre, nous montrons de manière plus effective les contributions de l'immunité biologique en pilotage, notamment en ce qui concerne la structuration et l'organisation de la connaissance nécessaire à la gestion des perturbations. Nous abordons aussi les questions relatives à la mise en œuvre informatique des propositions qui découlent de l'étude de l'immunité biologique

Enfin, dans le dernier chapitre, nous illustrons nos propositions sur des cas de perturbation.

Chapitre 3 : Principes immunitaires pour le pilotage de systèmes de production

RÉSUMÉ. Un des défis posés au pilotage de systèmes de production consiste à réagir efficacement aux perturbations afin de maintenir les objectifs de performance assignés. L'immunité biologique recèle un potentiel intéressant pouvant apporter des réponses à plusieurs exigences en matière de prise en compte et réaction aux perturbations. L'objectif de ce chapitre est d'adapter les principes immunitaires qui font le succès de l'immunité biologique au pilotage de systèmes de production soumis à des perturbations. Pour ce faire, nous proposons des analogies de structure et de mécanismes entre l'immunité biologique et le pilotage de systèmes de production. A partir de ces analogies, nous identifions les principales caractéristiques d'une architecture distribuée de pilotage, basée sur les principes immunitaires. Nous montrons que cette architecture est assez générique, dans le sens où elle permet de prendre en compte une variété de perturbations. Cette architecture met en œuvre des fonctions de détection, d'identification et de réaction aux perturbations, qui sont des fonctions spécifiquement dédiées au traitement des perturbations. Cette architecture permet de distribuer ces fonctions sur des composants (APC, B, Th et mémoire) inspirés de l'immunité biologique, tout en offrant des mécanismes de coordination entre ces composants et ces fonctions. Enfin, nous montrons que l'immunité biologique offre des concepts (PRR, PAMP, antigène, signal de danger, présentation antigénique) permettant de structurer la connaissance sur les perturbations, ainsi que sur les outils et les méthodes permettant d'y réagir.

3.1. Introduction

Un des rôles les plus délicats du pilotage de systèmes de production consiste à réagir efficacement aux perturbations afin de maintenir les objectifs de performance assignés.

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que l'immunité biologique fournit des solutions à des exigences requises pour une meilleure prise en compte des perturbations lors du pilotage de systèmes de production. L'immunité biologique peut notamment inspirer le développement de fonctions spécifiquement dédiées à la gestion des perturbations – telles que les fonctions de détection, d'identification et de réaction aux perturbations – la distribution de ces fonctions et la coordination entre elles, et le développement de mécanismes assez génériques pour prendre en compte une variété de types de perturbations.

Dans ce sens, l'objectif de ce chapitre consiste à adapter les concepts biologiques mis en valeur dans le chapitre précédent au contexte du pilotage de systèmes de production soumis à des perturbations.

Or, suite à l'étude des applications artificielles de l'immunité biologique dans le chapitre précédent, nous n'avons pas manqué de souligner que le problème du pilotage de systèmes de production soumis à des perturbations n'a pas encore été abordé par des approches immunitaires. D'autre part, nous avons remarqué l'absence d'une approche consensuelle de l'immunité artificielle.

Ces deux constats font que nous allons devoir élaborer notre propre démarche pour dégager des concepts immunitaires pertinents pour le pilotage de systèmes de production. L'objectif de cette démarche consiste à dégager aussi exhaustivement que possible, les contributions potentielles de l'immunité biologique dans le pilotage de systèmes de production. Ce potentiel réside dans la proposition d'une architecture distribuée de pilotage par les concepts immunitaires, dont nous soulignons les principaux mécanismes de détection, de classification, d'identification et de réaction aux perturbations.

Pour ce faire, nous montrons qu'il est possible d'envisager une analogie entre l'immunité naturelle et le pilotage de systèmes de production, et nous construisons cette analogie. Ceci consiste à établir un certain nombre de correspondances structurelles et fonctionnelles entre le monde biologique et le monde du pilotage. A partir de ces analogies, nous envisageons la conception d'un système immunitaire artificiel pour le pilotage. Nous situons ce système dans le paysage des systèmes d'information du système de production. Enfin, nous décrivons l'architecture de ce système en termes de composants, de mécanismes et de principales fonctions.

3.2. Analogies entre immunité biologique et pilotage de la production

Afin de doter les systèmes de pilotage de la production de fonctionnalités inspirées de l'immunité biologique leur permettant de prendre en compte et de gérer des perturbations, nous commençons par établir un certain nombre d'analogies entre les systèmes immunitaires

biologiques et les systèmes de pilotage de la production. Ces analogies sont de deux types : des analogies de structure et des analogies de mécanismes.

3.2.1. Analogies de structure

Les analogies de structure concernent l'identification des acteurs de l'immunité biologique afin de leur trouver des homologues artificiels pour leur attribuer des rôles équivalents.

Une première analogie consiste à assimiler un organisme biologique à un système de production. A l'image du système immunitaire biologique qui protège l'organisme contre les menaces qui le guettent, on peut envisager de doter le système de pilotage de la production d'une fonction qui lui permette de prendre en compte les perturbations. Ainsi, la contrepartie d'un *système immunitaire biologique* (SIB) est un *système immunitaire artificiel* (SIA) dont le rôle est d'assurer la gestion des événements qui peuvent perturber le système de production. Un SIB assure une *réponse immunitaire* à des éléments nocifs à l'organisme. De façon similaire, un SIA est destiné à assurer une *réaction aux perturbations*.

L'entité élémentaire d'un organisme biologique est la cellule. Les cellules se regroupent en organes, dont chacun participe dans l'accomplissement d'au moins une des fonctions vitales de l'organisme. De manière similaire, un système de production repose sur un ensemble d'entités élémentaires, physiques ou logiques, qui se coordonnent ou coopèrent pour accomplir les fonctions d'un système de production. Ainsi, chaque ressource de production (machine, outillage, opérateur), chaque gamme, nomenclature ou ordre matérialisant une activité de production est une entité élémentaire du système de production qui peut être assimilée à une cellule biologique.

Un corollaire à l'analogie entre organisme biologique et système de production consiste à assimiler les pathogènes biologiques aux perturbations du système de production. En biologie, un pathogène est une menace, intérieure (comme des cellules cancéreuses) ou extérieure (comme des virus ou des bactéries) à l'organisme, identifiée par des marqueurs spécifiques, dits antigènes, présents à la surface du pathogène. En pilotage, les pathogènes correspondent à des perturbations (pannes, retards, rupture de stock...) et les antigènes correspondent à des attributs pouvant caractériser les perturbations (par exemple la durée d'une panne).

Au sein d'un organisme biologique, les pathogènes sont pris en charge par les organes, les cellules et les molécules du système immunitaire biologique. Etant donnée la complexité de ce système, dont certains mécanismes et acteurs restent encore mal compris même à ce jour, nous nous intéressons à un sous ensemble réduit de ce système, formé par certaines cellules de l'immunité innée et de l'immunité adaptative, plus particulièrement les cellules APC, les lymphocytes *B*, les lymphocytes *Th* et les cellules mémoire.

Les cellules APC sont les cellules de l'immunité biologique innée qui sont responsables de l'initiation et de la supervision de la réponse immunitaire. Ces cellules sont capables de détecter la présence d'éléments nuisibles dans l'organisme, d'identifier l'appartenance de ces éléments à des classes génériques de pathogènes, et d'orienter en conséquence la réponse immunitaire adaptative. Les cellules APC sont enfin responsables du déclenchement, du guidage et de l'arrêt de la réponse immunitaire adaptative.

En pilotage, les cellules APC biologiques peuvent être assimilées à des entités intelligentes responsables de l'initiation et de la supervision d'une réaction contre les perturbations. Ces

entités assurent la détection d'anomalies ou d'évènements nuisibles, l'identification des classes de perturbations associées à ces anomalies et à ces événements, ainsi que l'évaluation de la performance de la réaction à la perturbation.

Les cellules APC biologiques initient la réponse immunitaire. Plus précisément, elles stimulent les lymphocytes *Th* de l'immunité adaptative en leur présentant les antigènes isolés à partir des pathogènes identifiés. Les lymphocytes *Th* identifient la non appartenance des antigènes à l'organisme et confirment le déclenchement d'une réponse immunitaire contre ces antigènes. Les lymphocytes *Th* coordonnent l'action des lymphocytes *B* et des cellules mémoire et ce, en fonction de la virulence du pathogène et de ses effets sur les cellules.

Dans le contexte du pilotage, les lymphocytes *Th* correspondent à des centres de décision capables de monter une réponse immunitaire, c'est-à-dire de déterminer une réaction à une perturbation et à ses conséquences. Parmi un ensemble d'actions de pilotage disponibles, le rôle des lymphocytes *Th* artificiels consiste à sélectionner les actions de pilotage les mieux adaptées pour remédier à la perturbation et à ses conséquences. Les lymphocytes *Th* artificiels assurent aussi la coordination entre ces actions pour optimiser la réaction aux perturbations ainsi qu'aux conséquences et risques soulevés par ces perturbations.

En immunité biologique, les lymphocytes *B* sont les cellules effectrices de la réponse immunitaire. Le rôle de ces cellules consiste à combattre et à éliminer l'antigène par la production d'anticorps. Dans le contexte du pilotage, les lymphocytes *B* correspondent à différentes actions de pilotage envisageables pour répondre à la perturbation et à ses conséquences. Par exemple, parmi les actions de pilotage, on peut « *trouver des fournisseurs de substitution* », « *trouver des sous traitants de substitution* », « *trouver des routages alternatifs* (pour le transport d'articles) », « *trouver des gammes de substitution* », « *trouver des nomenclatures de substitution* », « *réordonnancer des tâches* » ou encore « *annuler ou remplacer des ordres* ».

L'immunologie moderne identifie encore mal les acteurs biologiques intervenant dans le mécanisme de la mémoire immunitaire ainsi que la nature des interactions entre eux. Parmi les théories proposées, nous avons choisi de retenir celle qui confie la fonction de mémoire immunitaire à des cellules particulières dites « *cellules mémoires* ». Ces cellules conservent des fragments d'antigènes afin de les identifier rapidement et de s'activer immédiatement pour détruire la menace lors de futures rencontres avec le même antigène ou avec un antigène de structure très similaire à celle de l'antigène mémorisé.

En pilotage, une cellule mémoire artificielle correspond à une entité intelligente permettant de mémoriser une perturbation, ses conséquences et les actions de pilotage ayant permis de réagir à la perturbation et à ses conséquences. Ces cellules mémoires peuvent être réutilisées lors de futures réactions à l'occurrence des mêmes perturbations, ou à l'occurrence de perturbations similaires à celles ayant conduit à la création de ces cellules.

Nous proposons le [Tableau 3.1](#) pour récapituler les analogies de structure entre immunité biologique et artificielle. Ce tableau présente les principaux acteurs de l'immunité biologique et donne une description de leurs homologues artificiels.

Tableau 3.1: Analogies de structure entre immunité biologique et pilotage de la production.

Univers de l'immunité biologique	Univers des systèmes de production
Organisme biologique	Système de production
Cellule de l'organisme	Entité élémentaire, physique ou logique, d'un système de production (exemple : ressource, gamme, nomenclature, ordre)
Pathogène (bactérie, virus, ...)	Perturbation (exemple : panne, retard de livraison, ...)
Cellules APC	Entités intelligentes pour détecter des événements nuisibles, identifier les classes de perturbation et assurer un suivi d'application de la réponse immunitaire (réaction à la perturbation)
Cellules B	Actions de pilotage pour réagir à la perturbation et à ses conséquences
Cellules mémoire	Entité intelligente permettant de mémoriser une perturbation, ses conséquences et les actions de pilotage permettant de réagir à la perturbation et à ses conséquences
Cellules Th	Entité intelligente pour analyser les perturbations et leurs conséquences, et assurer une réponse immunitaire, c'est à dire proposer des plans de réaction à la perturbation

3.2.2. Analogies de mécanismes

Ces analogies concernent l'identification des interactions entre les acteurs de l'immunité biologique ainsi que la manière avec laquelle chaque acteur s'acquitte de son rôle. L'objectif est de dériver des mécanismes artificiels utiles dans le pilotage.

Pour ce faire, l'étude du fonctionnement de l'immunité biologique conduite dans le chapitre précédent nous permet de proposer le schéma de la [Figure 3.1](#) afin de synthétiser les principales interactions qui ont lieu dans un système immunitaire biologique. Cette abstraction représente un intérêt particulier pour le pilotage de systèmes de production.

Dès leur manifestation dans un organisme biologique, les pathogènes prolifèrent en se multipliant et en libérant leurs antigènes. Ces derniers peuvent aggraver des cellules et perturber leur fonctionnement normal.

Dans le contexte du pilotage, un pathogène est assimilé à une perturbation. Les antigènes correspondent à des attributs permettant de caractériser cette perturbation. Par exemple, en assimilant une « *panne machine* » à un pathogène, on peut considérer que les antigènes correspondent à la durée de la panne (durée d'immobilisation de la machine), aux valeurs des capteurs pouvant indiquer la manifestation de la panne (déviations ou mesures hors tolérances) ou encore au coût de la panne (coût d'immobilisation de la machine). Une perturbation se propage dans un système de production et affecte des entités de ce système, telles que des ressources, des activités, des stocks, etc.

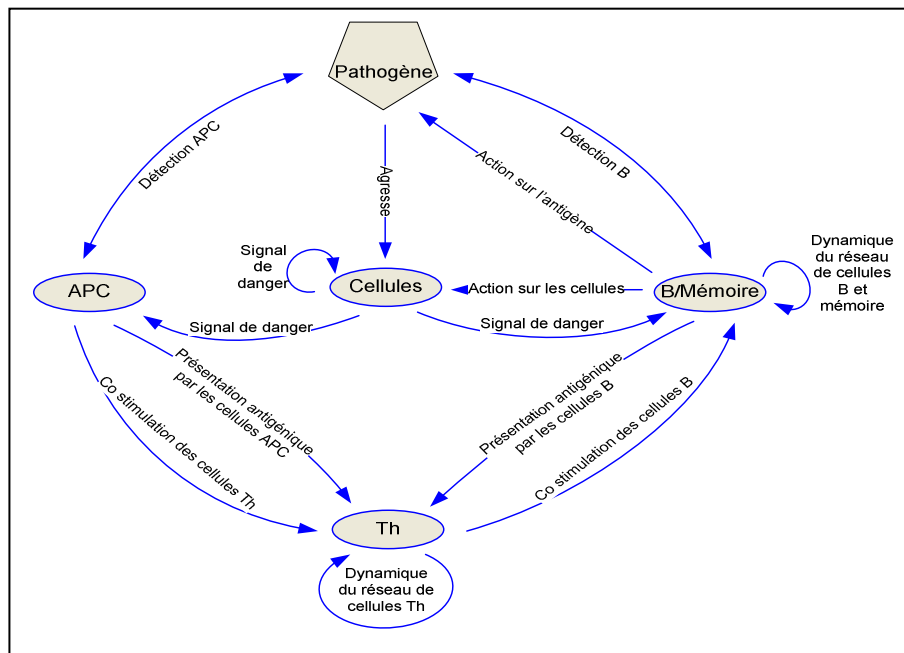


Figure 3.1: Abstraction des interactions dans un système immunitaire biologique.

Par analogie aux cellules agressées de l'organisme, qui émettent des signaux de danger pour alerter et informer de leur agression [Matzinger, 1998], il s'agit de donner aux entités physiques et logiques d'un système de production, autrement dit les cellules artificielles (ressources, activités, stocks, ...), la possibilité d'analyser, d'interpréter puis de signaler leur agression en émettant des signaux de danger.

Le concept biologique de danger correspond en pilotage à la détermination des conséquences directes et probables d'une perturbation sur les cellules artificielles. Les conséquences directes découlent des entités du système de production qui sont directement affectées par une perturbation. Par exemple, la conséquence directe d'une panne machine est l'indisponibilité de la machine pendant un intervalle de temps. Les conséquences probables correspondent aux risques encourus suite à l'occurrence de la perturbation. Ces conséquences découlent des entités du système de production qui peuvent être potentiellement affectées par la perturbation. Par exemple, une panne machine peut potentiellement générer des retards de production, une augmentation du taux de rebuts ou de rejets, et même des ruptures de stocks.

Les signaux de danger biologiques se propagent dans le voisinage des cellules agressées et établissent un périmètre de danger au sein duquel les cellules immunitaires sont sensibilisées à la présence d'antigènes [Matzinger, 1998].

En pilotage, la propagation des signaux de danger correspond à la propagation de la perturbation et de ses conséquences dans le système de production. Par conséquent, le périmètre de danger correspond à l'ensemble des entités du système de production (ressources, activités, stocks, ...) qui sont effectivement ou peuvent être potentiellement affectées par la perturbation.

Les pathogènes biologiques sont détectés par les cellules APC de l'immunité biologique innée. Ces cellules sont capables de détecter la présence d'éléments nuisibles dans

l'organisme, d'identifier l'appartenance de ces éléments à des classes génériques de pathogènes, et d'orienter en conséquence la réponse immunitaire adaptative en présentant des fragments de ces pathogènes (présentation antigénique) aux lymphocytes Th de l'immunité adaptative.

En pilotage, les cellules APC artificielles héritent les mécanismes biologiques de détection, d'identification et de présentation antigénique. Détecter les pathogènes revient à acquérir l'état et les événements du système de production à partir des systèmes d'information (tels que l'ERP et le MES) puis à les analyser afin de distinguer les événements sans conséquences de ceux qui peuvent entraîner des perturbations du système de production.

Identifier les pathogènes revient à déterminer la (ou les) classe(s) de perturbation par lesquelles le système de production se trouve potentiellement menacé. Il s'agit d'effectuer une classification des événements perçus pour vérifier leur éventuelle appartenance à des classes de perturbations.

Dans le cas où une perturbation est identifiée, la présentation antigénique est assimilée à la détermination des attributs de la perturbation et ce par exemple en estimant des paramètres manquants (tels que la durée d'une panne machine par exemple).

De leur côté, les lymphocytes B de l'immunité biologique adaptative sont stimulés par les signaux de danger – libérés par les cellules agressées – pour capturer les antigènes présents dans le périmètre de danger. La capture d'un antigène par un lymphocyte B a lieu dès que le lymphocyte B atteint un seuil d'activation. Ce seuil est fonction du degré d'affinité de ce lymphocyte avec l'antigène et de la concentration de l'antigène dans le périmètre de danger.

Dans le contexte du pilotage, les lymphocytes B artificiels correspondent à des actions de pilotage. Le concept d'affinité entre un lymphocyte B et un antigène se traduit à la fois par la compétence d'une action de pilotage à traiter une perturbation et par la faisabilité de l'action. Par exemple, l'action « *réapprovisionner matière* » n'est pas compétente pour traiter la perturbation « *panne machine* ». Cette perturbation, par contre, est plus du domaine de compétence des actions « *réparer ressource en panne* » et « *trouver une machine de substitution* ». Dans les cas où il n'existe pas de machine de substitution vers laquelle réorienter les tâches affectées, ou que la machine de substitution existe mais n'est pas disponible, alors l'action « *trouver une machine de substitution* » n'est pas faisable. Bien qu'elle soit compétente pour intervenir en cas de panne, cette action ne peut être activée.

Le concept de concentration d'un antigène dans le périmètre de danger se traduit par le degré de gravité de la perturbation. Par exemple, si la perturbation « *panne machine* » est plutôt de l'ordre d'un micro arrêt ou d'un micro blocage, il ne serait vraisemblablement pas nécessaire de faire appel à l'action « *trouver une machine de substitution* ». Par contre, cette action doit être envisagée si la panne se révèle être de durée plus importante, c'est-à-dire dans le cas où la durée de la panne dépasse un certain seuil de tolérance.

Ainsi, une action de pilotage est activée dès que son seuil d'activation est atteint. Ce seuil est fonction à la fois de la compétence de l'action pour traiter la perturbation, de la faisabilité de l'action compte tenu du contexte dans lequel le système de production se trouve au moment d'occurrence de la perturbation et du degré de gravité de la perturbation.

En immunité biologique, les lymphocytes B activés capturent les antigènes présents dans le périmètre de danger, les décomposent, les associent à des molécules dites « *MHC* » (pour « *Major Histocompatibility Complex* »), et présentent ces molécules à leur surface pour les communiquer aux lymphocytes Th. Cette présentation antigénique signale aux lymphocytes Th que les lymphocytes B ont identifié une anomalie et que ces lymphocytes B ont la possibilité de libérer des anticorps pour éliminer les antigènes responsables de la menace.

Dans le contexte du pilotage, les cellules B déterminent des actions de pilotage et présentent des propositions aux cellules Th artificielles. Par exemple, lorsqu'une perturbation de type « *panne machine* » a lieu, la cellule B correspondant à l'action de pilotage « *trouver une machine de substitution* » vérifie dans les systèmes d'information (par exemple l'ERP) l'existence d'alternatives de pilotage de type gamme de substitution ou machine équivalente. Ensuite, la cellule B vérifie dans les systèmes d'information (par exemple le MES) la disponibilité de la machine équivalente. Si une machine équivalente existe et si cette machine est disponible, alors la cellule B fait des propositions aux cellules Th contenant des dates de réaffectation possibles.

En biologie, les cellules mémoires sont des cellules particulières capables de conserver des antigènes afin d'accélérer leur reconnaissance lors de prochaines rencontres avec les mêmes antigènes ou avec des antigènes de structure très similaire.

Dans le contexte du pilotage, une cellule mémoire est une entité intelligente sensible à des attributs caractéristiques d'une perturbation (les antigènes) et à des conséquences de cette perturbation (les signaux de dangers). Cette cellule mémoire décrit la manière avec laquelle la perturbation et ses conséquences ont été traitées lors d'une occurrence précédente. Le principe d'activation d'une cellule mémoire est très similaire à celui d'une cellule B en termes de compétence, de faisabilité, et de degré de gravité de la perturbation. Une cellule mémoire stimulée par des antigènes, des signaux de danger et des cellules B présente aux cellules Th la manière avec laquelle ces antigènes et ces signaux de danger ont été traités par le passé afin que les cellules Th s'en servent lors de l'élaboration d'une réaction à une perturbation.

En biologie, les lymphocytes Th récupèrent les présentations antigéniques des lymphocytes B et des cellules mémoires. Ces présentations antigéniques signifient aux cellules Th que des cellules sont capables d'intervenir pour lutter contre le pathogène et ses antigènes. Les lymphocytes Th montent alors une réponse immunitaire en coordonnant l'action des lymphocytes B et des cellules mémoire. Cette coordination est assurée en confirmant ou en infirmant l'activation des lymphocytes B et des cellules mémoire.

Les cellules Th artificielles correspondent à des centres de décision qui déterminent des réponses immunitaires, c'est-à-dire des plans de réaction à une nouvelle perturbation et à ses conséquences. Pour ce faire, les cellules Th artificielles sont sensibles aux antigènes et aux signaux de dangers. Pour chaque antigène et signal de danger, les cellules Th récupèrent les propositions des cellules B et des cellules mémoires. Ensuite, le rôle des cellules Th artificielles consiste à combiner de façon cohérente les propositions des cellules B et des cellules mémoires pour réagir à la nouvelle perturbation considérée et à ses conséquences.

Les lymphocytes Th artificiels peuvent solliciter les lymphocytes B afin de déterminer les performances des réponses construites. Par exemple, si la réponse déterminée par un lymphocyte Th implique des actions du type « *réordonnancer des tâches affectées* », alors le lymphocyte Th peut communiquer les tâches affectées au lymphocyte B responsable de cette

action de pilotage et lui solliciter de déterminer un ordonnancement de bonne performance par rapport à un critère déterminé. Le lymphocyte B retourne au lymphocyte Th le meilleur ordonnancement trouvé ainsi que sa performance.

En biologie, les lymphocytes Th ne déclenchent une réponse immunitaire qu'après la réception d'un signal de confirmation de la part des cellules APC. En effet, les cellules APC co stimulent les lymphocytes Th pour les activer.

En pilotage, les lymphocytes Th communiquent les réponses trouvées aux cellules APC et aux cellules artificielles (entités du système de production). Ces cellules évaluent alors les réponses proposées afin d'en sélectionner la réponse la plus appropriée. L'évaluation d'une réponse s'effectue non seulement en fonction de sa performance, mais en plus en fonction des risques résiduels qu'elle induit. Le risque résiduel est le risque qui subsiste même après le traitement des conséquences ou des risques initiaux.

Par exemple, dans le cas d'une perturbation de type « *panne machine* », les conséquences sont l'immobilisation de la machine et des retards de quelques opérations programmées sur cette machine. Les risques peuvent être l'altération de quelques paramètres ou indicateurs de la machine tels que sa cadence de production ou ses taux de rebut et de rejet par exemple.

Une réponse immunitaire à cette perturbation consiste à réparer la machine et à reséquencer les opérations affectées. L'évaluation de cette réponse se fait non seulement en termes de critères de performance, mais aussi en termes de risques résiduels. Pour le critère de performance, il peut s'agir par exemple du calcul du retard maximal ou de la somme des retards dans la nouvelle séquence. Pour les risques résiduels, il peut s'agir par exemple de la détermination du risque que la machine tombe en panne de nouveau, ou du risque que l'altération de ses paramètres et indicateurs initiaux (cadence de production, taux de rejet, taux de rebuts) persiste. Ces informations peuvent être renseignées par les experts en maintenance.

Le **Tableau 3.2** récapitule les analogies de mécanismes entre immunité biologique et artificielle.

Tableau 3.2: Analogies de mécanismes entre immunité biologique et pilotage de la production.

Mécanismes biologiques	Mécanismes artificiels
Danger	Risque qu'une entité du système de production soit affectée par une perturbation. Le risque caractérise la conséquence négative qu'une perturbation peut potentiellement avoir sur une entité du système de production
Signaux de danger	Conséquences directes ou probables de la perturbation sur les entités du système de production
Propagation des signaux de danger	Propagation d'une perturbation et de ses conséquences et détermination des entités du système de production, directement ou potentiellement affectées par la perturbation
Périmètre de danger	Ensemble des entités du système de production qui sont immédiatement, ou qui peuvent être potentiellement affectées par la perturbation
Détection par les cellules APC	Déterminer si l'état et les événements du système de production correspondent à des anomalies, des déviations ou à des événements qui peuvent entraîner des perturbations
Identification par les cellules APC	Classification des anomalies, des déviations et des événements en des classes de perturbations
Présentation antigénique APC – Th	Caractérisation d'une perturbation. Par exemple, déterminer la durée de la perturbation.
Co stimulation APC – Th	Evaluation de la performance des réponses et sélection de la réponse la plus appropriée
Affinité entre une cellule immunitaire (B ou mémoire) et un antigène ou un signal de danger	Compétence et faisabilité d'une action de pilotage (cellule B) ou d'une ancienne réponse (cellule mémoire) pour intervenir dans le traitement d'une perturbation et/ou ses conséquences
Présentation antigénique B – Th	Proposition d'actions de pilotage pour intervenir dans le traitement d'une perturbation et/ou ses conséquences
Présentation antigénique mémoire – Th	Stimulation de cellules mémoires pour intervenir dans le traitement d'une perturbation comme on l'aurait fait suite à une première rencontre
Propagation de lymphocytes Th	Détermination de réponses immunitaires

3.3. Adaptation des analogies au contexte du pilotage

Les analogies présentées dans la section précédente servent à dégager des propositions pour la conception et le développement d'un système immunitaire artificiel dont le rôle est de prendre en compte et de gérer les perturbations dans un système de production. Ces propositions concernent l'architecture du système, les mécanismes de détection et de classification des perturbations, l'identification des conséquences et des risques générés par les perturbations, les mécanismes de réaction aux perturbations et enfin, l'organisation et la structuration des connaissances sur les perturbations.

3.3.1. Architecture du système

Nous avons vu dans le [chapitre 1 \(état de l'art sur le pilotage\)](#) que la décentralisation et la distribution de la prise de décision dans les systèmes de pilotage contribuent à une meilleure réactivité des systèmes de pilotage face aux perturbations.

De ce point de vue, le système immunitaire biologique repose sur une architecture distribuée, qui met en œuvre un ensemble d'acteurs autonomes face aux menaces biologiques. Ces acteurs correspondent à la fois aux cellules de l'organisme et aux cellules immunitaires qui veillent sur l'intégrité de l'organisme. De plus, l'immunité biologique met en œuvre des mécanismes de coordination et de coopération entre ces cellules, tels que la stimulation, la co stimulation, l'activation ou l'inhibition des cellules immunitaires.

Les analogies structurelles présentées au début de ce chapitre permettent d'envisager la conception d'un système immunitaire artificiel pour le pilotage. Ce système peut être architecturé de manière similaire à l'immunité biologique. Dans ce système, non seulement la prise de décision, mais aussi les fonctions spécifiques au traitement des perturbations sont distribuées sur un ensemble de composants logiciels inspirés des acteurs biologiques.

Ces composants interagissent conformément à des mécanismes de coordination et de coopération qui peuvent être inspirés des mécanismes biologiques. Ces composants assurent des fonctions spécifiques au traitement des perturbations. Les fonctions qui nous intéressent sont la fonction de détection, d'identification et de réaction aux perturbations.

3.3.2. Détection et classification des perturbations

La gestion des perturbations dans un système de production exige que le système de pilotage soit capable de se rendre compte de l'occurrence de ces perturbations. En effet, à partir de l'acquisition de l'état et des événements du système de production, le système de pilotage doit être en mesure de distinguer les événements sans conséquences sur le système de production, de ceux qui peuvent potentiellement entraîner des perturbations et nuire à ses performances ou à l'intégrité de ses entités.

Les anomalies (valeurs inattendues de capteurs par exemple) et les déviations (écarts par rapport à des consignes par exemple) sont souvent des symptômes révélateurs de perturbations. Lorsque ces symptômes sont détectés, le système de pilotage doit aussi être capable de déterminer le type de la perturbation que ces symptômes peuvent entraîner. La détermination du type d'une perturbation permet d'orienter la réaction vers les actions de pilotage appropriées à son traitement.

Par exemple, des déviations par rapport à des normes de qualité d'un produit fabriqué peuvent être les signes révélateurs de problèmes liés aux ressources (panne machine, usure d'outillage) ou de problèmes liés à la matière. Les actions de pilotage appropriées au traitement des problèmes des ressources (maintenance, sous-traitance, ...) diffèrent des actions de pilotage appropriées au traitement des problèmes des matières (réapprovisionnement). C'est en ayant la capacité de déterminer le type de perturbation auquel ces déviations se rapportent que le système de pilotage sera en mesure de déclencher l'une ou l'autre de ces actions de pilotage.

Nous avons vu au [chapitre 1 \(état de l'art sur le pilotage\)](#) que peu de travaux adressent la problématique de la détection et de la classification des perturbations dans un système de production. La majorité des travaux fixent à priori les types des perturbations traitées (généralement les problèmes des ressources, plus particulièrement les pannes machines) et proposent des approches destinées à une prise en compte spécifique à ces types.

Or l'étude conduite au [chapitre 2](#), nous montre que l'immunité biologique propose des concepts et des mécanismes dédiés à la détection et à la classification des pathogènes. Parmi ces concepts, on retrouve ceux de « *PAMP* » et de « *PRR* » qui permettent aux cellules APC de l'immunité biologique innée de détecter des classes génériques de pathogènes, et les concepts d'antigène et d'affinité qui permettent aux cellules B et mémoire de l'immunité adaptative de détecter spécifiquement un pathogène. Il se trouve que ces mécanismes sont génériques par rapport à la grande diversité des types de pathogènes qui peuvent exister dans la nature et menacer l'organisme.

L'adaptation de ces concepts et de ces mécanismes au contexte du pilotage permet de concevoir une fonctionnalité dédiée à la détection et à la classification des perturbations, et qui, de surcroît, est générique par rapport aux types de perturbations. À partir de l'acquisition de l'état du système de production, il devient alors possible d'effectuer une classification afin de déduire le type des perturbations qui peuvent potentiellement menacer le système de production.

La détection et la classification des perturbations permettent d'en déterminer les conséquences directes et potentielles sur le système de production.

3.3.3. Identification des conséquences des perturbations

Le fort degré d'intégration et l'interdépendance entre les composantes d'un système de production peuvent amener une perturbation à se propager rapidement au sein de ce dernier. Nous avons vu au [chapitre 1](#) que la perturbation peut alors mettre le système de production dans des états indésirables, le faire dévier de ses objectifs initiaux de performance et/ou lui faire subir des conséquences préjudiciables.

Pour assurer une prise en compte aussi exhaustive que possible des perturbations, le système de pilotage doit être capable de déterminer les conséquences d'une perturbation détectée. Ici aussi, nous avons vu au [chapitre 1](#) que peu de travaux proposent des concepts pour déterminer les conséquences d'une perturbation sur un système de production, aussi bien les conséquences immédiates (en termes d'entités directement et indirectement affectées) que probables (c'est-à-dire les conséquences qui risquent d'avoir lieu suite à l'occurrence d'une perturbation).

Or l'étude conduite au [chapitre 2](#), nous montre que l'immunité biologique propose des concepts et des mécanismes dédiés à l'identification des dangers suite à la détection d'une menace dans l'organisme. Le concept de danger permet aux cellules de l'organisme de signaler leur agression et/ou leur exposition à un pathogène et/ou à ses antigènes. Le concept de périmètre de danger et le mécanisme de propagation des signaux de danger permettent à l'organisme de propager l'effet d'une menace bien au-delà du lieu précis où cette dernière a été détectée.

L'adaptation du concept de danger et du mécanisme de propagation des signaux de danger au contexte du pilotage permet de concevoir une fonctionnalité dédiée à l'identification des conséquences immédiates et probables d'une perturbation sur le système de production. Chaque entité du système de production devient alors capable de déterminer les conséquences auxquelles elle est exposée de manière directe ou potentielle.

La détection des perturbations et l'identification de leurs conséquences permettent d'orienter la réaction du système.

3.3.4. Réaction aux perturbations

Le rôle d'un système de pilotage est d'assurer en permanence un état de bon fonctionnement du système de production. Pour ce faire, un système de pilotage doit être capable de prendre des décisions et d'appliquer des actions de pilotage en fonction de l'état du système de production. Ceci est plus particulièrement vrai à la manifestation de perturbations.

Au [chapitre 1](#), nous avons vu que la plupart des travaux de la littérature qui considèrent des perturbations, les traitent en recourant soit à des décisions d'affectation/réaffectation de tâches aux ressources, soit à des décisions d'ordonnancement/ré ordonnancement. D'autres actions de pilotage faisant intervenir la maintenance, la sous-traitance, la gestion des stocks ou l'approvisionnement par exemple sont souvent ignorées.

Or dans le [chapitre 2](#), nous avons vu que l'immunité biologique met en œuvre une variété de cellules pour faire face aux menaces biologiques. L'immunité biologique ne privilégie pas l'action d'un seul type de cellules, mais au contraire, active les cellules les plus compétentes en fonction de la nature de l'agression et de ses effets sur l'organisme. L'action de ces cellules est coordonnée par plusieurs mécanismes tels que la stimulation, la co stimulation, l'activation ou l'inhibition des cellules immunitaires.

La réponse à une menace est profilée en fonction du type de cette menace. Les mécanismes déployés restent génériques dans la mesure où les mécanismes qui gouvernent la coordination entre les cellules immunitaires activées sont indépendants du type de la menace.

L'adaptation des mécanismes de réponse biologiques au contexte du pilotage permet d'envisager des contributions sur trois niveaux : la détermination d'actions et de stratégies de pilotage recommandées pour une perturbation et ses conséquences, le développement de mécanismes de coordination entre ces actions et enfin la capitalisation de l'expertise et de la connaissance qui découlent de la gestion des perturbations. Dans le cadre de ce travail, nous mettons particulièrement l'accent sur ce dernier point, qui concerne la structuration et l'organisation des connaissances issues de la gestion des perturbations.

3.3.5. Structuration des connaissances sur les perturbations

L'immunité biologique représente un système qui réussit sa tâche de protéger l'organisme contre les agressions. Ce système est constamment confronté à des problèmes de gestion d'informations et de connaissances sur les agressions.

En effet, l'immunité biologique est capable de détecter des éléments nuisibles grâce à la comparaison des caractéristiques de ces éléments à celles du Soi. Ce système est capable d'identifier des menaces en générant et en propageant des signaux de danger qui renseignent sur le lieu, la nature et l'intensité de ces menaces. Il est capable de réagir contre ces menaces en activant les cellules qui réussissent le mieux à reconnaître les caractéristiques spécifiques de ces menaces. Enfin il est capable de mémoriser ces menaces grâce au stockage et à la préservation des caractéristiques qui ont conduit à les identifier et à les éliminer. Toutes ces capacités montrent l'aptitude de l'immunité biologique à gérer, à restituer et à utiliser l'information et la connaissance sur les agressions.

En plus de la contribution dans l'architecture d'un système de pilotage, qui reflète les aspects dynamiques du traitement des perturbations, l'immunité biologique peut contribuer sur un plan statique qui concerne l'organisation et la structuration des connaissances sur les perturbations.

En effet, l'immunité biologique peut guider la conception d'une base de connaissances destinée à capitaliser les connaissances sur les perturbations. Cette base de connaissances est destinée à stocker des informations et des connaissances qui permettent de caractériser les perturbations, de caractériser les conséquences des perturbations, de déterminer quelles actions de pilotage préconiser pour intervenir dans quelle situation, et de mémoriser les réactions trouvées.

Les composants de l'architecture distribuée de pilotage par les principes immunitaires puiseront leurs connaissances dans cette base pour accomplir leurs rôles. Aussi, cette base pourra servir de support de communication entre ces composants.

Parmi les contributions potentielles de l'immunité biologique que nous nous proposons de dégager dans ce chapitre, la structuration des connaissances sur les perturbations représente la contribution effective de ce travail de recherche et fera l'objet d'une description détaillée dans le chapitre suivant.

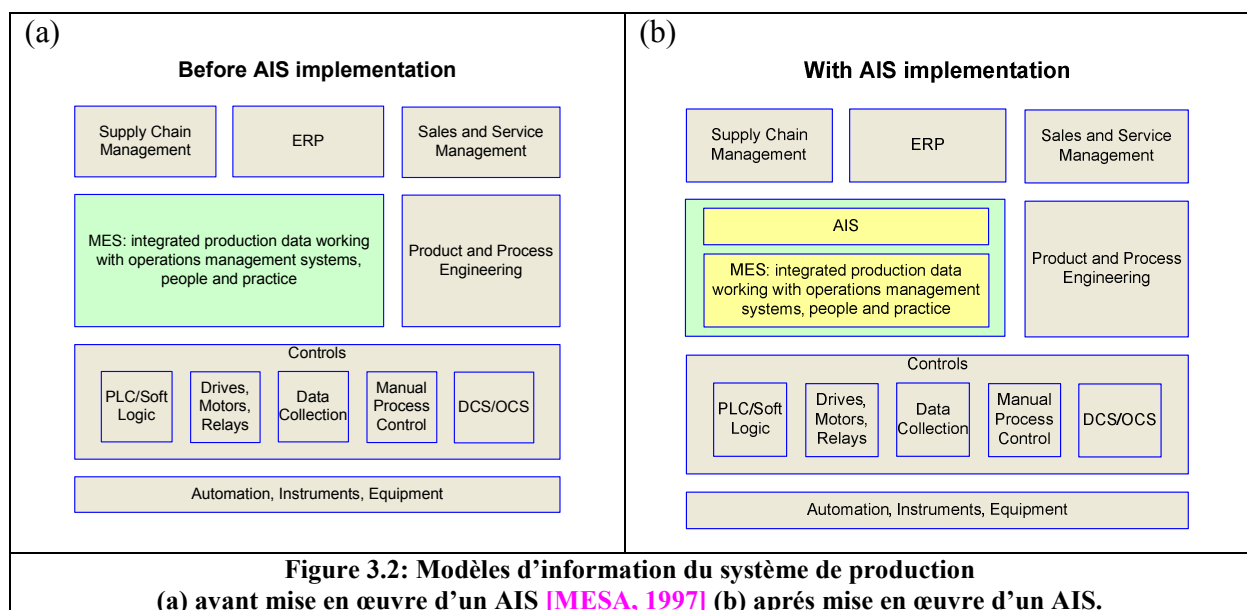
3.4. Architecture d'un système immunitaire artificiel pour le pilotage

Dans cette section, nous essayons de donner une description de l'architecture d'un système immunitaire artificiel pour le pilotage. Pour ce faire, nous commençons par positionner le système par rapport aux systèmes d'information. Ensuite, nous introduisons les composants du système, les fonctions remplies par chaque composant, et les interactions entre ces composants.

3.4.1. Positionnement par rapport aux systèmes d'information

Le système immunitaire artificiel (SIA) pour le pilotage doit pouvoir communiquer avec les systèmes d'information ainsi qu'avec les décideurs du système de production, à la fois en recevant des données de la part de ces intervenants, et en générant des données vers ces intervenants.

L'association *MESA International* propose la **Figure 3.2 (a)** pour positionner le système MES par rapport au modèle d'information d'un système de production [MESA, 1997]. Or, comme nous l'avons constaté au **chapitre 1**, les 11 fonctions d'un système MES n'intègrent pas une fonction dédiée à la gestion des perturbations. Comme la raison d'être d'un système immunitaire artificiel pour le pilotage est de prendre en compte et de gérer les perturbations, nous proposons de positionner ce système conformément à la **Figure 3.2 (b)**.



Dans cette figure, le système SIA vient se greffer au système MES de façon à pouvoir s'interfacer à la fois avec ce système et avec les autres systèmes d'information, tels que les systèmes de gestion de la chaîne logistique (« *Supply Chain Management* », SCM), les systèmes de planification et d'ordonnancement (« *Advance Planning and Scheduling* », APS) les systèmes de gestion intégrée (« *Enterprise Resource Planning* », ERP) ou les systèmes d'ingénierie des produits et des processus (« *Product/Process Engineering* », PPE) comme par exemple le système de conception et de fabrication assistées par ordinateur (CFAO).

Afin d'illustrer la nature des échanges entre le système SIA et les autres systèmes d'information, nous introduisons la **Figure 3.3**.

Le SIA récupère des systèmes d'information, tels que les systèmes ERP, SCM, GMAO et GQAO (Gestion de la Maintenance et de la Qualité assistées par ordinateur), les différents ordres matérialisant les activités en train de se dérouler au sein du système de production. Ces activités peuvent être des activités d'approvisionnement (OA : ordres d'achat), des activités de transport (OT : ordres de transport), des activités de fabrication (OF : ordres de fabrication), des activités de maintenance (OM : ordres de maintenance), des activités de contrôle qualité (OQ : ordres qualité) ou toute autre activité de production.

Aussi, le SIA récupère à partir des systèmes d'information, tels que les systèmes APS, les plannings permettant de gérer et d'organiser le déroulement de ces activités dans le temps, tels que les plannings de production (ordonnancement), les plannings de maintenance préventive, les plannings de réception d'articles achetés, les plannings de livraison de produits finis aux clients etc. Ces plannings définissent des relations de précédence entre les activités et reflètent certains des objectifs de performance pré assignés au système de production.

Enfin, le SIA est alimenté avec les données techniques du système de production, telles que les spécifications techniques des produits et des ressources ainsi que les alternatives disponibles : listes des fournisseurs, des sous traitants, des nomenclatures et des gammes de fabrication des produits, par exemple. Ces alternatives peuvent faire l'objet de propositions d'actions de pilotage telles que par exemple « *trouver un fournisseur de substitution* », « *trouver un sous traitant* », « *trouver une gamme de substitution* », etc.

De la part du système MES, le SIA récupère l'information sur l'état actualisé des activités et des ressources du système de production. Cet état peut être décrit par exemple en termes de disponibilité des ressources, d'occurrence de certains événements (arrêts de machines, bris d'outils, ...), de mesure de certains paramètres (cadences de production, mesure de la qualité des produits, ...), d'acquisition de l'état de certains capteurs (température, pression, position et vitesse de chariots, ...) ou encore en termes de détermination d'indicateurs de performance (encours, retards, temps de séjour dans l'atelier, ...).

Ayant acquis ces données, le SIA a la responsabilité de maintenir un état de bon fonctionnement du système de production, et ce, en détectant, en identifiant et en générant des réponses aux perturbations. Les réponses générées correspondent à la détermination d'actions de pilotage recommandées contre les perturbations et leurs conséquences. Ainsi, le SIA peut annuler certains ordres émis, demander la création de nouveaux ordres, différer l'exécution de certains ordres et enfin modifier les caractéristiques d'autres ordres, telles que les quantités produites, les délais fixés ou les ressources affectées. Ces modifications sur les ordres matérialisant les activités du système de production sont effectuées en sollicitant les fonctions du système MES ou celles des systèmes d'information de plus haut niveau (ERP, SCM, ...).

Le SIA est aussi en interaction avec les décideurs du système de production. En effet, ces derniers interviennent dans le contrôle du SIA en formalisant et en spécifiant les objectifs de performance à atteindre, en l'alimentant de leur expertise, en le renseignant avec des données dont l'acquisition automatique n'est pas possible (par exemple l'absentéisme d'opérateurs), et enfin en validant les propositions du système.

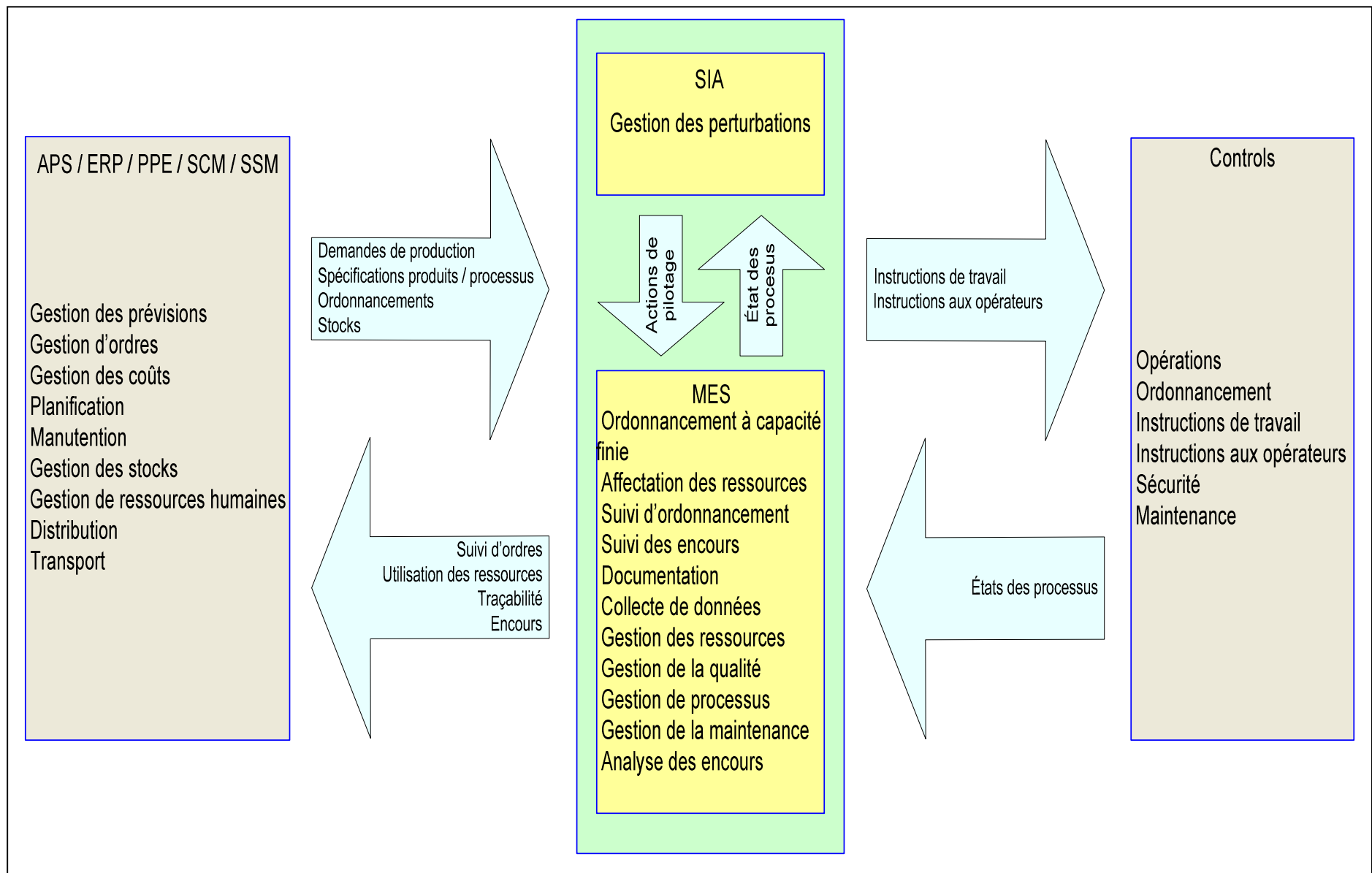


Figure 3.3: Interactions du système AIS avec l'environnement.

3.4.2. Composants du système

Les analogies de structure avec l'immunité biologique nous montrent qu'un système immunitaire artificiel pour le pilotage peut reposer sur une architecture distribuée dont les composants actifs sont des pathogènes, des cellules artificielles, des cellules APC, des cellules B, des cellules mémoires et des cellules Th. Ci après une description de ces composants, de leurs rôles et de leurs interactions.

3.4.2.1. Pathogènes

La détection d'une perturbation donne lieu à un pathogène. Un pathogène est un composant de l'architecture immunitaire artificielle dont le rôle est de refléter la dynamique d'une perturbation dans le système de production. Cette dynamique consiste à se propager dans le système de production, à agresser ses entités (telles que les ressources, les stocks, les activités, etc.) et à stimuler des actions de pilotage et des plans de réaction à la perturbation.

Le pathogène se propage dans le système de production et agresse ses entités en libérant des antigènes. Les antigènes correspondent à des attributs qui permettent de caractériser une perturbation. Par exemple, en assimilant une perturbation de type « *panne machine* » à un pathogène, on peut considérer que les antigènes correspondent à la durée de la panne (durée d'immobilisation de la machine), aux valeurs des capteurs pouvant indiquer la manifestation de la panne (déviations ou mesures hors tolérances) ou encore au coût de la panne (coût d'immobilisation de la machine).

La propagation de l'antigène « durée de panne » peut agresser les dates de début et de fin des opérations programmées sur la machine. La propagation de l'antigène « déviations ou mesures hors tolérances » peut agresser des indicateurs de la qualité des produits dont les opérations sont programmées sur la machine en panne. La propagation de l'antigène « coût de panne » peut agresser les prix de revient des produits dont les opérations sont programmées sur la machine en panne.

Les antigènes libérés stimulent des cellules B, des cellules mémoire et des cellules Th. Comme on le verra tout de suite, les cellules B correspondent à des actions de pilotage, les cellules mémoire correspondent à de précédentes réactions à des antigènes identiques ou similaires, et les cellules Th correspondent aux nouvelles réactions en construction.

Par exemple, l'antigène « durée de panne » stimule des actions de maintenance corrective et préventive, l'antigène « déviations ou mesures hors tolérances » stimule des actions de contrôle qualité, et l'antigène « coût de panne » stimule des actions de sous-traitance (s'il l'on estime qu'il vaut mieux sous traiter la fabrication d'un produit plutôt que de subir des surcoûts de production dus à l'immobilisation de la machine).

3.4.2.2. Cellules artificielles

Une cellule artificielle est associée à chaque entité du système de production (ressources, stocks, activités de production, etc.) et reflète son comportement. Chaque cellule artificielle a accès aux données techniques qui caractérisent l'entité à laquelle la cellule est associée et/ou à l'état de référence que cette entité doit satisfaire en fonctionnement normal (non perturbé).

Chaque cellule artificielle doit en permanence se mettre à jour avec l'état actualisé de l'entité qu'elle représente.

Par exemple, une cellule artificielle associée à une opération d'une gamme opératoire a accès aux données techniques décrivant cette opération, telles que le temps de réglage standard, la machine et l'outillage standard (par défaut), la cadence de production standard, le coût de revient standard, etc. Cette cellule artificielle est constamment mise à jour avec les données actualisées de suivi d'exécution de l'opération.

Chaque cellule de l'organisme envoie aux cellules APC artificielles des comptes rendus sur l'état actuel de l'entité représentée, par rapport à l'état de référence dans lequel cette dernière devrait, en principe, se trouver. Ces comptes rendus servent à détecter des perturbations comme on le verra par la suite.

Par exemple, la cellule artificielle associée à l'opération de gamme envoie périodiquement aux cellules APC des comptes rendus contenant la cadence de production standard et la cadence de production réelle de la machine sur laquelle l'opération est en train de s'exécuter, ainsi que les dates de début et de fin prévues (ordonnancement initial) et réalisées (suivi d'exécution).

Les cellules artificielles sont sensibles aux antigènes libérés par les pathogènes introduits parmi les cellules du système immunitaire artificiel suite à la détection de perturbations. Chaque cellule artificielle détermine si les caractéristiques (données techniques, états de référence) de l'entité qu'elle représente sont concernées par les antigènes. Dans l'affirmative, chaque cellule détermine les conséquences immédiates et/ou probables des antigènes sur ces caractéristiques, puis diffuse des signaux de danger pour signaler son agression. Les signaux de danger correspondent aux conséquences déterminées.

Par exemple, la cellule opération de gamme est sensible à l'antigène « durée de panne ». La cellule opération détermine la conséquence de cet antigène sur les dates de début et de fin de production prévues. Au cas où ces dates sont affectées, la cellule libère un signal de danger pour signaler cette modification.

Enfin, les cellules artificielles devraient être munies de mécanismes leur permettant d'évaluer les conséquences résiduelles des réponses immunitaires proposées par les cellules Th. Les conséquences résiduelles d'une cellule reflètent le niveau de danger dans lequel la cellule va se retrouver si une réponse immunitaire est appliquée. La détermination des conséquences résiduelles permet de rendre compte d'un aspect de la performance de la réaction à une perturbation.

3.4.2.3. Cellules APC

Les cellules APC artificielles sont les composants du système immunitaire artificiel en charge de surveiller l'état du système de production à l'affût de l'occurrence de perturbations.

Ces cellules acquièrent des comptes rendus de la part des cellules de l'organisme spécifiant l'état de référence dans lequel ces cellules devraient se trouver et l'état réel dans lequel elles se trouvent effectivement. Ces comptes rendus permettent aux cellules APC de détecter les anomalies de fonctionnement du système de production et d'identifier les types de perturbation qui risquent d'avoir lieu à partir des anomalies détectées. Lorsqu'une

perturbation est identifiée, la cellule APC lance un pathogène dans le système en renseignant ses antigènes.

Par exemple, la cellule artificielle associée à une opération de gamme envoie périodiquement aux cellules APC des comptes rendus contenant entre autres la cadence de production standard et la cadence de production réelle de la machine sur laquelle l'opération est en train de s'exécuter. La cellule APC en charge de détecter les défaillances des ressources détecte toute déviation intolérable de cadence et peut en déduire un risque de perturbation de type « panne machine ». La cellule APC détermine alors une estimation de la durée de cette panne, soit en consultant l'historique des événements similaires, soit en signalant le risque de perturbation à un expert tout en lui demandant une estimation de la durée de la panne.

Enfin, les cellules APC devraient participer dans l'évaluation des réponses immunitaires proposées par les cellules Th en termes de conséquences résiduelles. Dans le cas d'une « panne machine » par exemple, la cellule APC en charge de détecter les défaillances des ressources devrait être munie de mécanismes lui permettant d'évaluer les réponses qui contiennent des actions de réparation de la machine et d'estimer par exemple le risque que cette machine retombe en panne, ou bien le risque qu'une modification de la cadence de production persiste.

3.4.2.4. Cellules B

Les cellules B artificielles sont les composants du système immunitaire artificiel en charge de proposer des actions de pilotage. Chaque cellule B représente une action de pilotage sensible à la présence d'antigènes et/ou de signaux de danger. Trois critères conditionnent l'activation d'une cellule B : la compétence de l'action pour intervenir sur la perturbation et/ou ses conséquences, la gravité de la perturbation et/ou de ses conséquences et l'état du système de production.

Par exemple, en cas de « panne machine », l'antigène « durée de panne » stimule l'action de pilotage « réparer machine ». Ce même antigène et les signaux de danger émis par les cellules associées aux opérations affectées stimulent les actions de pilotage « reséquenceur », « réaffecter » et « sous traiter ». L'action de réaffectation ne devient active que lorsque l'état du système de production le permet, c'est-à-dire lorsque la ressource vers laquelle on va réaffecter les opérations est disponible. De même, l'action de sous-traitance ne devient active que lorsque des sous traitants existent et sont disponibles.

Comme on le verra plus en détail par la suite, les cellules B actives stimulent des cellules mémoires pour les activer et les faire intervenir dans la réaction à la perturbation. Les cellules B sont enfin en charge d'optimiser et de mettre en œuvre les réponses immunitaires déterminées par les cellules Th.

3.4.2.5. Cellules mémoires

Les cellules mémoires sont les composants du système immunitaire artificiel en charge de mémoriser les réactions aux perturbations et à leurs conséquences. Dans le cas d'une nouvelle occurrence d'une perturbation, les cellules mémoires sont stimulées par les antigènes, les signaux de danger et les cellules B afin de restituer les réponses qui ont déjà servi à réagir à des perturbations similaires ou identiques.

Les conditions d'activation d'une cellule mémoire sont similaires à celles d'une cellule B. Une fois une cellule mémoire activée, elle fait des propositions aux cellules Th en charge d'élaborer des réactions aux perturbations et à leurs conséquences.

Lorsqu'une réponse a été sélectionnée et appliquée, la cellule Th correspondante est stockée en tant que cellule mémoire afin de servir lors de prochaines rencontres avec des perturbations et/ou des conséquences similaires ou identiques.

3.4.2.6. Cellules Th

Les cellules Th sont les composants du système immunitaire artificiel en charge de proposer des réponses cohérentes pour réagir aux perturbations et à leurs conséquences. Les cellules Th devraient être munies de mécanismes leur permettant de construire ces réponses en combinant les propositions des cellules B et mémoire. A ce stade, les cellules Th devraient pouvoir solliciter les cellules B pour évaluer les réponses en fonction d'objectifs de performance.

Par exemple, dans le cas d'une perturbation de type « *panne machine* » qui affecte des opérations, les cellules Th devraient pouvoir solliciter l'action de réordonnancement pour déterminer un nouvel ordonnancement des opérations affectées. La performance est évaluée par exemple en calculant le retard maximal ou la somme des retards qu'on cherchera à minimiser.

Ensuite, les réponses trouvées devraient être présentées aux cellules APC et aux cellules artificielles pour évaluation des conséquences résiduelles. Dans cette étape, les cellules APC et les cellules artificielles devraient être munies de mécanismes leur permettant de déterminer l'aptitude des réponses proposées à éliminer ou à réduire les conséquences et les risques générés par la perturbation.

Les cellules Th devraient alors être munies de mécanismes leur permettant de sélectionner la meilleure réponse possible à une perturbation et à ses conséquences. Cette sélection devrait tenir compte de l'évaluation des réponses en termes d'objectifs de performance assignés au système de production et en termes de conséquences résiduelles.

La réponse sélectionnée devrait alors être mise en œuvre en stimulant les cellules B pour appliquer les actions de pilotage recommandées par la réponse et en co stimulant les cellules APC pour assurer un suivi de la mise en œuvre de la réponse. Enfin, les cellules Th sont stockées comme des cellules mémoires pour servir lors de prochaines rencontres avec des perturbations et/ou des conséquences similaires ou identiques.

Le [Tableau 3.3](#) permet de présenter les composants d'un système immunitaire artificiel pour le pilotage, et de synthétiser les responsabilités dont chaque composant doit s'acquitter.

Tableau 3.3: Acteurs d'un système immunitaire artificiel pour le pilotage et leurs rôles.

Acteur	Rôles
Pathogène	<ol style="list-style-type: none"> 1. libérer des antigènes dans le système 2. agresser des entités du système de production (cellules artificielles) 3. stimuler des actions de pilotage (cellules B) 4. stimuler des cellules mémoire 5. stimuler des cellules Th
Cellule artificielle	<ol style="list-style-type: none"> 1. acquérir l'état actualisé de l'entité représentée 2. présenter aux cellules APC des comptes rendus sur l'état de l'entité représentée 3. vérifier si une perturbation concerne l'entité représentée 4. déterminer l'impact d'une perturbation sur l'entité représentée en termes de conséquences directes, indirectes ou probables 5. diffuser des signaux de danger pour signaler l'agression de l'entité représentée par une perturbation 6. évaluer les réponses immunitaires proposées par les cellules Th en déterminant les conséquences résiduelles sur l'entité représentée
Cellules APC	<ol style="list-style-type: none"> 1. acquérir des comptes rendus de la part des cellules de l'organisme 2. détecter la présence d'anomalies à partir des comptes rendus reçus 3. identifier les types de perturbation à partir des anomalies détectées 4. signaler la présence de perturbations aux cellules B, Th et mémoire 5. évaluer les réponses immunitaires proposées par les cellules Th
Cellules B	<ol style="list-style-type: none"> 1. détecter la présence de perturbations dans le système 2. détecter les signaux de danger émis par les cellules agressées de l'organisme 3. stimuler des cellules mémoire et des cellules Th : proposer des actions de pilotage pour réagir aux perturbations 4. optimiser action de pilotage 5. appliquer la réponse immunitaire sélectionnée
Cellules mémoire	<ol style="list-style-type: none"> 1. détecter la présence de perturbations dans le système 2. détecter les signaux de danger émis par les cellules agressées de l'organisme 3. détecter les actions de pilotage disponibles pour réagir aux perturbations 4. stimuler des cellules Th : restituer un plan de réaction aux perturbations et à leurs conséquences tel qu'il a été proposé lors de précédentes réactions à des perturbations et/ou des conséquences similaires
Cellules Th	<ol style="list-style-type: none"> 1. proposer des réponses cohérentes pour réagir aux perturbations et à leurs conséquences en combinant les propositions des cellules B et mémoire 2. sélectionner la meilleure réponse possible à une perturbation et à ses conséquences 3. co stimuler cellules B : déclencher une réponse 4. assurer un suivi des réponses 5. stocker réponse en tant que cellule mémoire

3.5. Création d'un réseau de cellules à superviser

L'étape de création d'un réseau de cellules artificielles consiste à constituer une représentation logique des entités physiques (ressources matérielles) et logiques (activités et ressources informationnelles) du système de production afin de les piloter contre les perturbations. En effet, il s'agit de retrouver la contre partie artificielle des cellules et des tissus d'un organisme biologique que l'immunité biologique défend contre les menaces qui les guettent.

Afin de définir plus formellement une activité du système de production, nous adoptons le modèle (tâche – activité – acteur) introduit par **Didier Gourc [2006]**. Ce modèle, illustré par la **Figure 3.4**, définit les concepts de tâche, d'acteur, de procédure et d'activité comme suit :

- Une *tâche* est définie par l'énoncé d'un objectif d'obtention d'un objet technique appelé « objet technique produit » par modification des caractéristiques d'un ou plusieurs objets techniques appelés « objets techniques primaires ou intermédiaires ».
- Un *acteur* est l'association de plusieurs ressources pour la réalisation d'une tâche.
- Une *procédure* définit la succession des différentes actions de la réalisation d'une tâche. Cette décomposition revient à préciser « comment » la tâche doit être réalisée.
- Une *activité* est la réalisation concrète d'une tâche par un acteur conformément à la procédure établie.

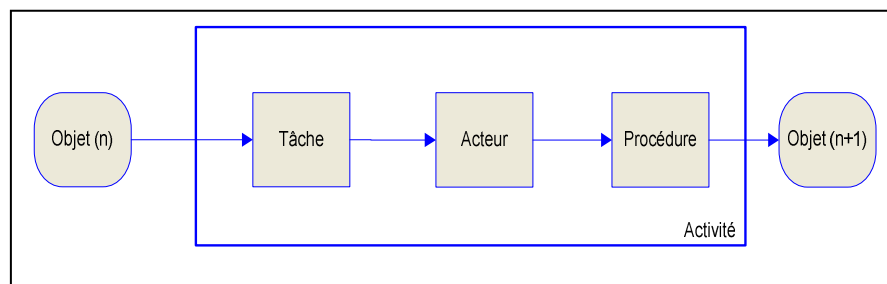


Figure 3.4: Modèle conceptuel (tâche - activité - acteur) [Gourc, 2006].

Dans notre contexte, il s'agit d'associer une cellule artificielle à chacun des concepts du modèle (tâche – activité – acteur). Etant donné que dans un système de production, il co existe plusieurs activités de natures différentes (activités d'approvisionnement, de transport, de fabrication, de maintenance, de contrôle qualité, ...), la **Figure 3.5** permet de montrer un sous ensemble non exhaustif des types de cellules artificielles qui peuvent être créées.

Parmi ces cellules, on distingue :

- Les clients et les fournisseurs du système de production,
- Les ressources physiques : machines, outillages, opérateurs,
- Les ressources informationnelles : nomenclatures, gammes de fabrication, procédures régissant le déroulement des activités,
- Les articles qui sont les objets manipulés (approvisionnés et fabriqués),
- Les opérations correspondant aux tâches,
- Les ordres qui matérialisent les activités du système de production.

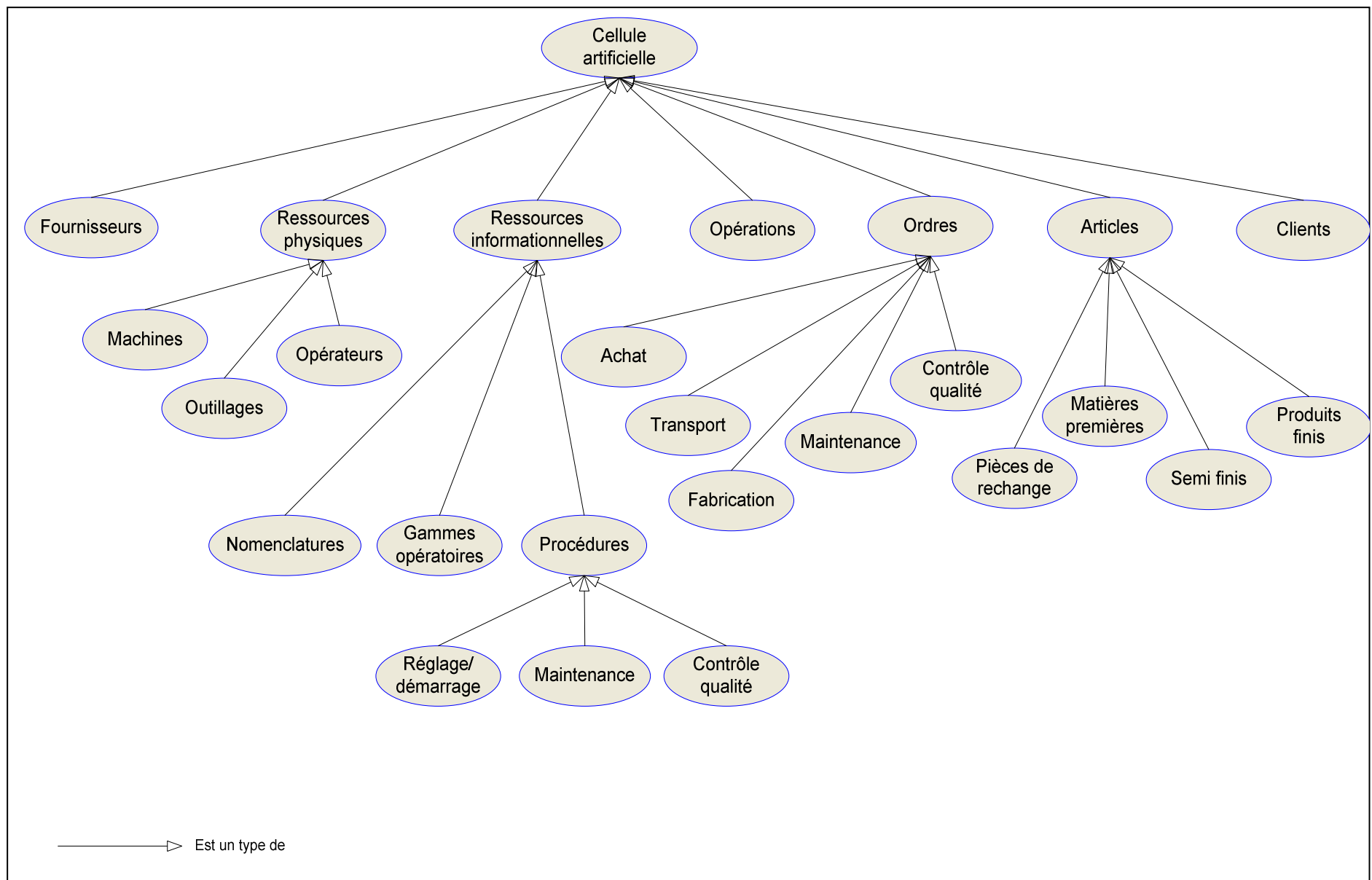


Figure 3.5: Types de cellules artificielles.

Par exemple, la **Figure 3.6** illustre les cellules biologiques associées aux concepts du modèle (tâche – activité – acteur) dans le cas particulier d’une activité de fabrication d’un article semi fini ou fini. Il s’agit de fabriquer un article semi fini (Objet_(n+1)) à partir de matières premières (Objets_(n)). Dans cet exemple :

- Une cellule matière est associée à chacune des matières premières nécessaires pour la fabrication de l’article.
- Une cellule nomenclature est associée à la nomenclature de matières premières nécessaires pour la fabrication de l’article.
- Une cellule opération est associée à chaque tâche de fabrication correspondant à une opération de gamme.
- Une cellule ressource est associée à chaque ressource de production nécessaire à l’accomplissement de la tâche, telle que machine, outillage ou opérateur.
- Une cellule gamme est associée à la gamme de fabrication de l’article spécifiant l’ensemble des opérations à réaliser sur les ressources pour aboutir à l’article fabriqué.
- Une cellule ordre de fabrication est associée à l’objet qu’on souhaite produire.

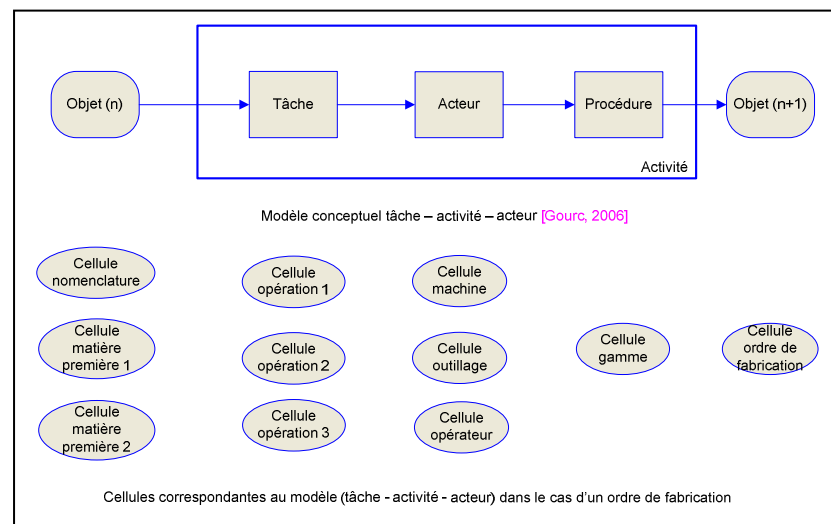


Figure 3.6: Modèle conceptuel (tâche - activité - acteur) [Gourc, 2006] et analogie biologique.

Par ailleurs, les cellules biologiques sont liées entre elles au sein de tissus. Dans le contexte du pilotage, il s’agit de reproduire ce tissu entre les cellules artificielles créées. Ce tissu est la représentation logique, non seulement des relations et des contraintes qui existent entre les entités du système de production, mais aussi des spécifications techniques de ces entités. Il s’agit donc de créer des liens de spécification entre cellules artificielles, comme l’illustre la **Figure 3.7**.

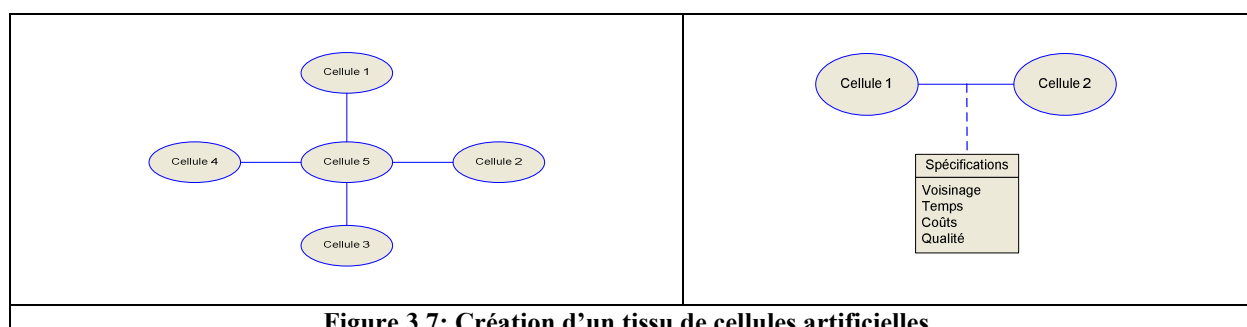


Figure 3.7: Création d’un tissu de cellules artificielles.

Le **Tableau 3.4** donne un exemple de la nature de ces liens de spécification particulièrement dans le cas d'activités de production.

Tableau 3.4: Nature des liens du tissu entre cellules artificielles dans le cas d'activités e production.

Spécification	Description	Exemples
Voisinage	Relations de voisinage avec d'autres entités physiques ou logiques du système de production	<p>Contraintes de précédence entre opérations d'une même gamme de fabrication</p> <p>Contraintes de précédence entre opérations requérant la même ressource de production</p> <p>Disponibilité d'une matière première pour une nomenclature de fabrication d'un article</p> <p>Disponibilité d'une nomenclature et/ou d'une gamme pour un ordre de fabrication</p>
Temps	Conditions nominales de déroulement de l'activité dans le temps	Cadence/durée de production nominale
Coût	Conditions nominales de coûts pour le déroulement de l'activité	Budget/coût de revient nominal
Qualité	Conditions nominales de qualité pour le déroulement de l'activité	<p>Paramétrage/réglage nominal des ressources de production</p> <p>Spécifications qualité d'un produit</p>

Parmi les relations et les contraintes existant entre les activités du système de production, on distingue notamment les contraintes technologiques qui découlent de la conception du produit (comme le déroulement dans le temps des opérations d'une gamme de fabrication par exemple) ainsi que les relations de précédence établies par les différents plannings de production. Dans le **Tableau 3.4**, nous désignons ces relations et ces contraintes par le terme « spécifications de voisinage » entre cellules.

Les spécifications techniques d'une activité de production se déclinent, entre autres, en termes de temps, de coûts et de qualité, comme l'illustre le **Tableau 3.4**.

- Les spécifications de temps précisent les conditions nominales de déroulement de l'activité dans le temps, comme par exemple la durée requise pour l'exécution d'une tâche sur une ressource ou la cadence de production.
- Les spécifications de coûts précisent les conditions nominales de coûts pour le déroulement de l'activité, comme par exemple le budget alloué à l'activité ou le coût de revient nominal d'un article fabriqué.

- Les spécifications de qualité précisent les conditions nominales de qualité pour le déroulement de l'activité comme par exemple les conditions de conformité d'un article fabriqué à une norme qualité.

Ainsi, les spécifications techniques d'une activité de production précisent les conditions nominales ou standards du déroulement de l'activité. Le qualificatif « nominal » ou « standard » désigne des valeurs conventionnelles représentatives d'un état de fonctionnement qui peut être considéré comme normal ou tolérable pour le système de production. Ces conditions nominales ou standards sont spécifiées par exemple par les experts ou les praticiens d'un système de production. Elles peuvent être décrites par la formulation d'intervalles de tolérances pour les paramètres mesurés (sorties de capteurs, cartes de contrôle) et/ou les indicateurs de performance calculés.

En fonction du système de production, d'autres types de liens peuvent être définis et représentés, tels que des liens de sécurité (au sens des normes OHSAS 18 000), qui définissent des exigences de sécurité pour les biens et les personnes, ou les liens d'environnement (au sens des normes ISO 14 000), qui définissent des exigences en termes de préservation de la nature et de l'environnement.

Les cellules artificielles et le tissu entre elles sont créés à partir des systèmes d'information. Les systèmes de gestion intégrée (ERP), de gestion de la chaîne logistique (SCM), et de gestion assistée par ordinateur (GMAO, GQAO, ...) peuvent fournir les informations sur les ordres lancés matérialisant les activités en cours du système de production (ordres d'achat, de transport, de fabrication, de maintenance, de contrôle qualité, ...) ainsi que les données techniques relatives à ces ordres (nomenclatures, gammes, routages, ...). Les systèmes de planification et d'ordonnancement (APS) peuvent fournir les relations de précedence établies par les différents plannings des activités.

Dans la **Figure 3.8** ci-dessous, nous reprenons l'exemple de la **Figure 3.6** en montrant le tissu de cellules artificielles créé.

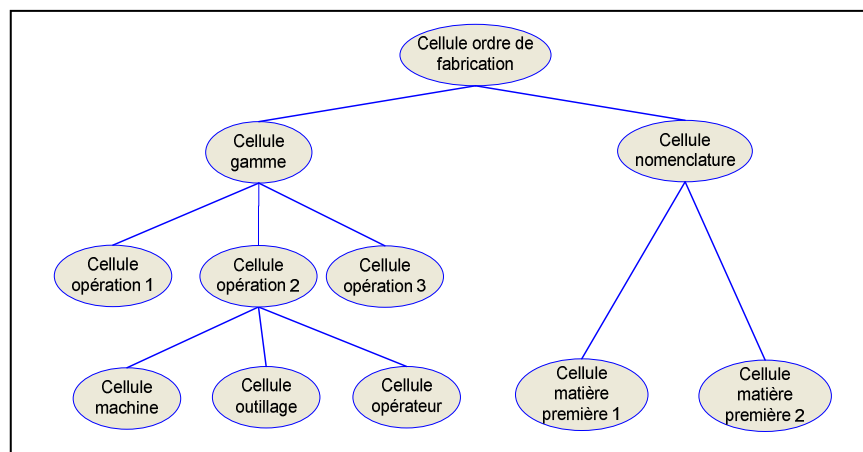


Figure 3.8: Tissu de cellules artificielles dans le cas d'un ordre de fabrication.

Le **Tableau 3.5** reprend plus en détail la nature des liens du tissu entre ces cellules artificielles.

Tableau 3.5: Exemple d'une cellule opération de fabrication et de ses liens avec d'autres cellules de son voisinage.

Voisinage		Spécifications		
De cellule	Vers cellule	Temps	Coût	Qualité
Opération 2	Ressource (machine, outillage, opérateur)	Durée standard d'exécution de l'opération sur la ressource	Coût standard d'utilisation de la ressource	Paramètres standard de réglage et de conduite de la ressource
Opération 2	Opération précédente requérant la même ressource	Dates de début et de fin d'exécution de l'opération précédente requérant la même ressource		
Opération 2	Opération suivante requérant la même ressource	Dates de début et de fin d'exécution de l'opération suivante requérant la même ressource		
Opération 2	Opération précédente de la gamme opératoire (Opération 1)	Dates de début et de fin d'exécution de l'opération précédente de la gamme opératoire (Opération 1)		Paramètres/indicateurs standard à obtenir suite à l'exécution de l'opération précédente de gamme (Opération 1)
Opération 2	Opération suivante de la gamme opératoire (Opération 3)	Dates de début et de fin d'exécution de l'opération suivante de la gamme opératoire (Opération 3)		
Opération 2	Gamme	Dates de début et de fin d'exécution de l'opération courante (opération 1)	Budget/Coût de revient standard de l'opération courante (opération 2)	Paramètres/indicateurs standard à obtenir suite à l'exécution de l'opération courante (opération 2)
Gamme	Ordre de fabrication	Dates de début et fin d'exécution de la gamme	Budget/Coût standard de fabrication de l'article	Spécifications qualité d'un produit
Nomenclature	Ordre de fabrication	Dates de début et fin de réquisition de la nomenclature	Budget/Coût standard des matières premières de l'article	Spécifications qualité d'un produit
Matière première	Nomenclature	Dates de début et fin d'allocation de la matière à la nomenclature	Coût standard d'approvisionnement de la matière	Spécifications qualité de la matière

3.6. Détection et identification des perturbations

Dans cette section, nous nous proposons de montrer comment les principes de l'immunité biologique peuvent contribuer à aider dans la détection des perturbations à partir des événements perçus du système de production.

Pour ce faire, nous proposons une classification des perturbations. Ensuite, nous proposons une manière de caractériser chacune de ces classes afin de pouvoir vérifier l'appartenance d'un événement à une classe de perturbation. Enfin, nous montrons comment il est possible de détecter une perturbation en se basant sur la caractérisation des classes de perturbations.

3.6.1. Classification des perturbations

Dans un système de production, les perturbations ne sont pas toutes identiques. En effet, les perturbations diffèrent par les causes qui les engendrent, la nature des conséquences qu'elles entraînent et des actions qu'elles nécessitent.

Nous adoptons la terminologie de l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leur Effet et de leur Criticité), qui précise qu'une perturbation est une cause de défaillance du système de production [Cauvin, 2005]. En se basant sur les principales catégories de perturbations décrites par Cauvin (2005) et précédemment introduites dans le chapitre 1, notamment par la figure 1.11, nous proposons la classification des perturbations de la Figure 3.9. Le Tableau 3.6 permet de mieux décrire les classes de perturbations introduites.

Remarquons que la classification que nous proposons tient compte des défauts d'approvisionnement, des problèmes de disponibilité des ressources internes et des problèmes de variation de la demande, soit les catégories 1 à 3 de la figure 1.11. Nous pensons que les problèmes liés aux défauts d'informations et aux décisions intempestives méritent un examen plus attentif.

En ce qui concerne les problèmes de disponibilité des ressources internes, notre classification reste compatible avec les propositions de Grabot et Geneste (1994). En effet, nous retrouvons les quatre principaux types de perturbations internes que ces auteurs ont identifiés : les rebuts, les non conformités, le blocage d'opérations et la défaillance de machines [Pujo *et al.*, 2002a].

Finalement, au regard du niveau le plus bas de la classification de la Figure 3.9, nous proposons d'examiner le type de perturbation en question par rapport à l'entité du système de production concernée. Ainsi, les problèmes fournisseurs, par exemple, sont examinés par rapport à chaque article approvisionné.

Tableau 3.6: Classification des perturbations.

Classes de problèmes	Sous classes	Description
Défaillances d'approvisionnement	Problèmes fournisseurs	Problèmes de production chez les fournisseurs de bien et/ou de services (retards de livraison, produits non-conformes)
	Problèmes de transport	Problèmes dus à la logistique de transport et à l'acheminement des biens du site de production du fournisseur vers le site du système de production
Défaillances des ressources	Blocages	Arrêts et micro arrêts des ressources qui ne requièrent pas d'interventions de maintenance corrective lourdes susceptibles de suspendre l'opération en cours d'exécution
	Pannes	Arrêts qui entraînent un blocage des ressources en attente d'une intervention de maintenance corrective lourde, c'est-à-dire susceptible de suspendre l'opération en cours d'exécution
Défaillances des produits	Rebuts	fabrication de pièces non conformes et qui ne peuvent être reprises pour les rendre conformes. Ces pièces sont éliminées et doivent être relancées en urgence en fabrication
	Non conformités	fabrication de pièces qui, bien que non conformes, peuvent être reprises en production afin de corriger leurs défauts
Défaillances des clients	Commandes urgentes	Réception de commandes urgentes par les clients ou les marchés du système de production
	Annulations de commandes	Annulation de commandes déjà programmées
Défaillances environnementales	Restrictions énergétiques	Restrictions sur l'utilisation de certaines ressources telles que l'eau en cas de sécheresse par exemple
	Perturbations climatiques	Conditions climatiques défavorables au bon déroulement de l'activité du système de production, telles qu'une très grande chaleur (canicule) qui risque de détériorer des stocks ou d'influer sur les caractéristiques des machines et des produits par exemple.

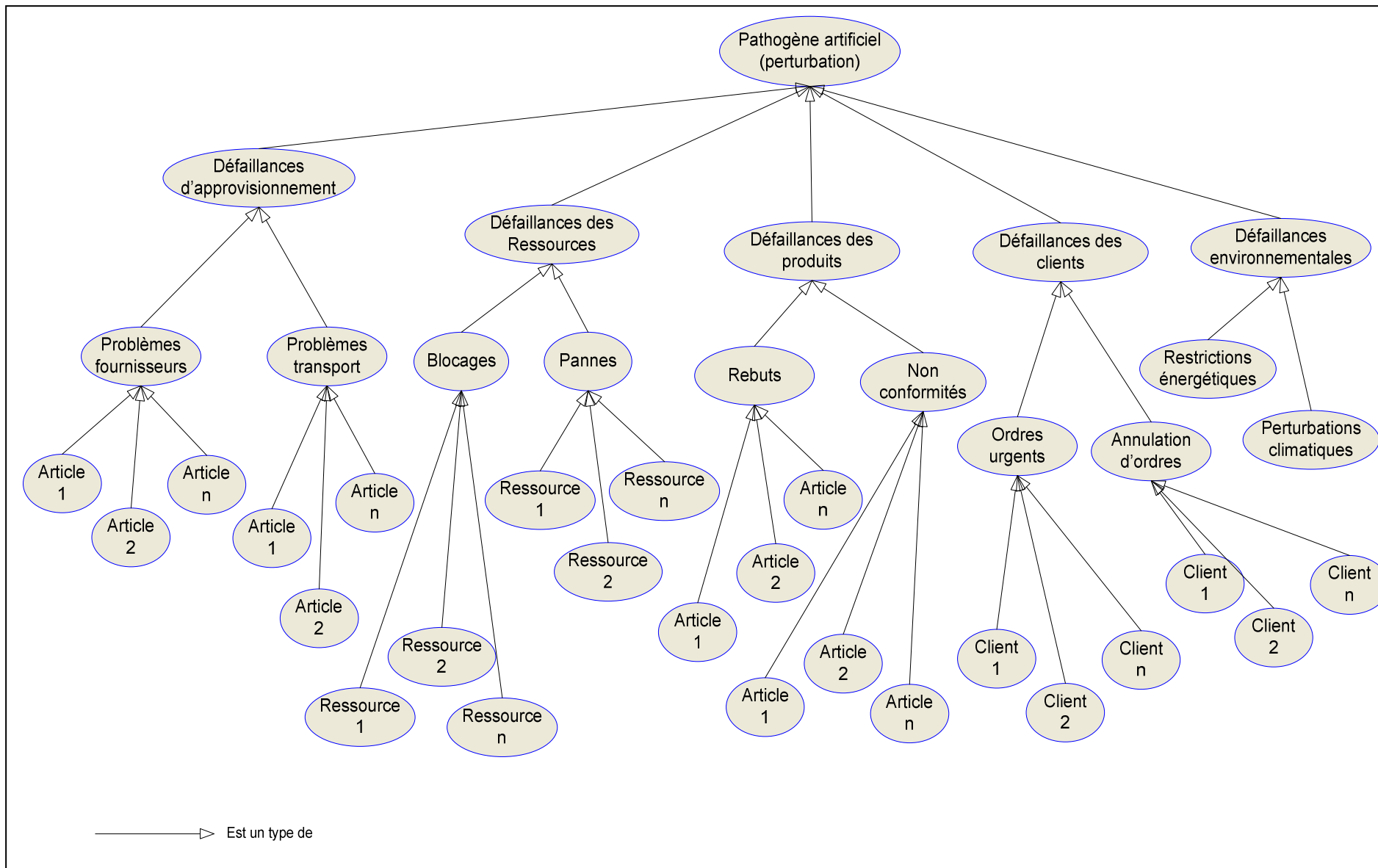


Figure 3.9 : Classification des perturbations.

3.6.2. Identification des classes de perturbations

L'immunité biologique nous enseigne que les pathogènes expriment à leur surface des motifs moléculaires appelés PAMP (« *Pathogen Associated Molecular Patterns* »). Ces motifs sont reconnus par des récepteurs appelés PRR (« *Pattern Recognition Receptors* ») présents à la surface des cellules APC de l'immunité innée. La reconnaissance des PAMP induit une activation des cellules APC et permet d'initier une réaction immunitaire. Remarquons ici que les récepteurs PRR sont prédestinés à ne reconnaître que des éléments étrangers à l'organisme.

Dans le contexte du pilotage, le système immunitaire artificiel perçoit le système de production par exemple à travers l'acquisition de mesures, l'acquisition de l'état de capteurs et/ou le calcul d'indicateurs de performances. Ces éléments peuvent être fournis par le système MES. Afin de vérifier si les événements perçus correspondent à des perturbations, les concepts de PAMP et de PRR de l'immunité innée peuvent être d'une grande utilité.

En effet, l'idée consiste à associer des PAMP aux pathogènes, c'est-à-dire caractériser l'appartenance d'un événement à une classe de perturbations en définissant, pour chaque classe, des critères d'appartenance. On peut considérer que ces critères correspondent au non respect de spécifications ou de paramètres « standard » dans lesquels, en situation normale, le système de production devrait se trouver. Ces spécifications et/ou ces paramètres standards ne sont pas respectés si les mesures acquises à partir du système de production se situent par exemple en dehors de tolérances considérées comme normales pour le fonctionnement du système de production.

La [Figure 3.10](#) permet d'illustrer ce principe.

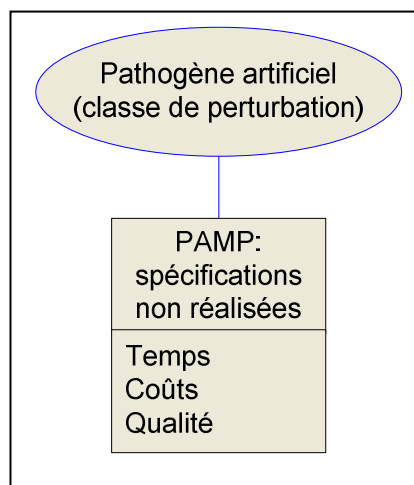


Figure 3.10: Caractérisation d'une classe de perturbations.

Ainsi, un PRR correspond à des spécifications (paramètres, mesures, indicateurs) « standard » que le système de production doit en permanence satisfaire. Dans ce cas, un PAMP correspond à des conditions de non respect de ces spécifications (paramètres, mesures et/ou

indicateurs hors tolérances), ce qui pourrait impliquer la présence potentielle d'une perturbation.

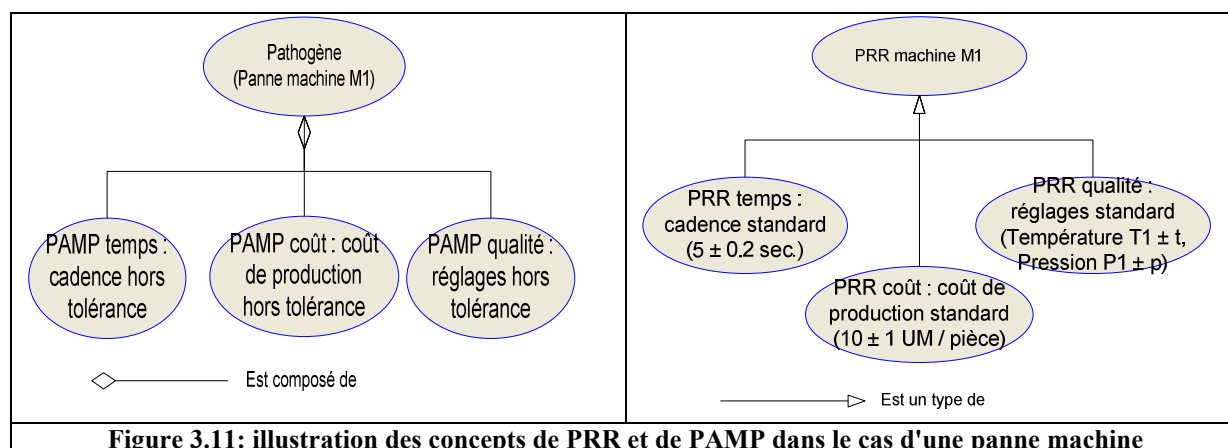
En termes de pilotage, un évènement du système de production peut le plus souvent être caractérisé par des mesures acquises ou des valeurs calculées d'indicateurs de performance. Le fait de vérifier que ces caractéristiques ne respectent pas des spécifications, permet de classer l'évènement dans une classe de perturbations.

Le **Tableau 3.7** suivant donne des exemples de quelques non spécifications pouvant être utilisées pour vérifier l'appartenance d'un évènement à une classe de perturbations.

Tableau 3.7: Caractérisation des perturbations.

PRR	Exemple : Spécifications à respecter	PAMP	Exemple : conditions de non réalisation des spécifications
Temps	Durée cumulée d'arrêt tolérée Cadence nominale de production Délai nominal d'approvisionnement	Violation des tolérances sur les délais et les durées	Durée d'arrêt ressource hors tolérance. Cadence de production hors tolérances. Durée d'approvisionnement hors tolérance.
Coût	Budgets/prix de revient standard	Violation des tolérances sur les budgets/prix de revient standard	Hausse du prix d'achat hors tolérance Coût de revient d'un article fabriqué hors tolérance
Qualité	Spécifications, normes, exigences des clients	Violation de spécifications, de normes et/ou d'exigences de clients	Caractéristiques des matières premières non conformes aux spécifications

Dans le cas d'une panne machine par exemple, la **Figure 3.11** permet d'illustrer les PAMP et les PRR permettant d'aboutir à la détection de la panne.



La **Figure 3.12** permet d'illustrer l'organisation des spécifications du système de production en termes de PRR.

Sur cette figure, nous avons illustré trois types de PRR, relatifs à la gestion du temps, des coûts et de la qualité. Bien entendu, en fonction du système de production, d'autres spécifications peuvent être représentées, telles que des spécifications de sécurité ou des spécifications relatives au management environnemental.

Soulignons aussi que nous assimilons les valeurs cibles des indicateurs de performance (par exemple le retard maximal, la taille maximale des encours, le TRS, ...) à des types particuliers de spécifications qui peuvent être renseignées en tant que PRR.

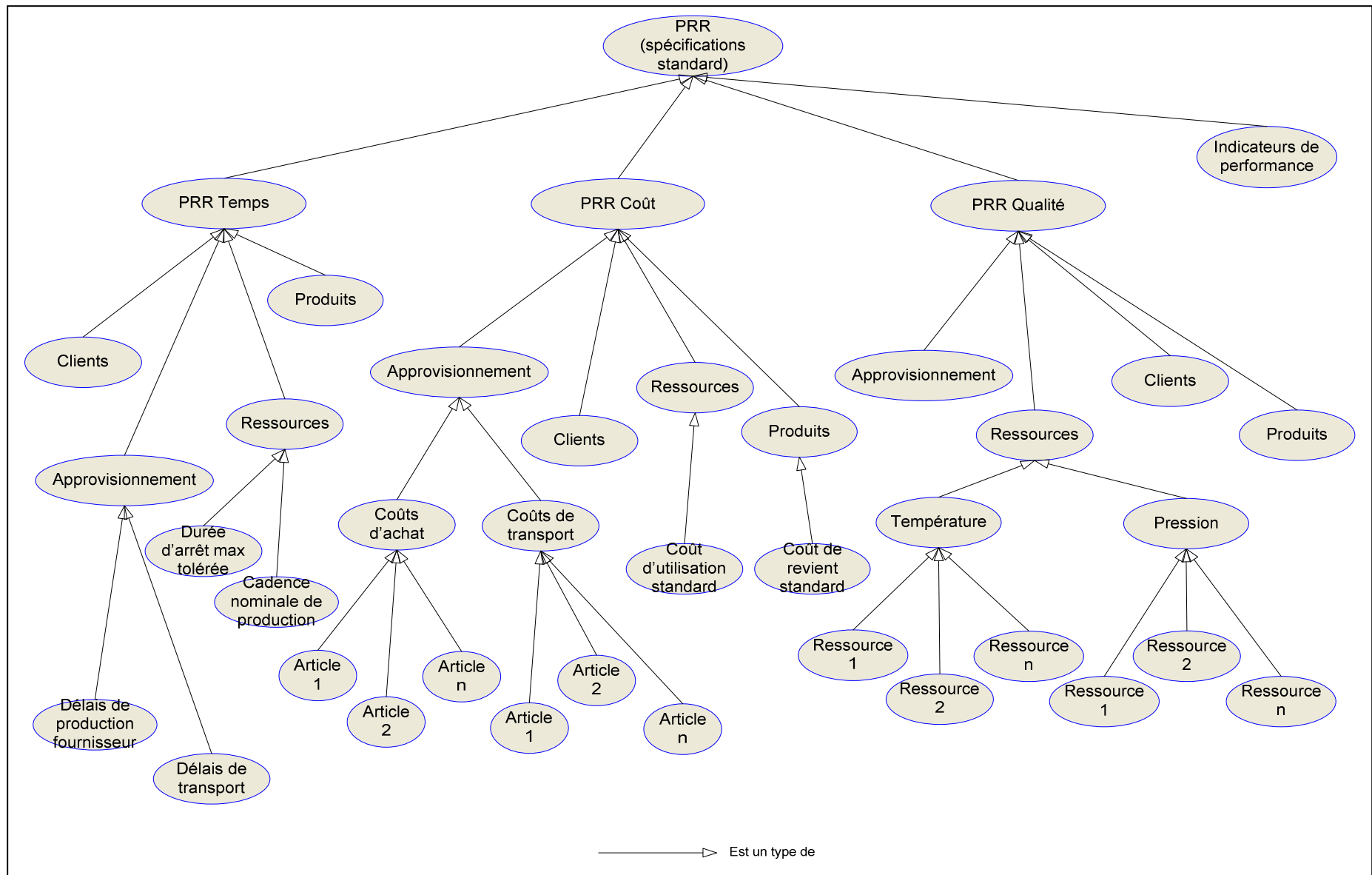


Figure 3.12: Exemples de spécifications standards d'un système de production.

3.6.3. Détection des perturbations

La détection des perturbations est la fonction qui permet de déterminer si le fonctionnement du système de production peut être considéré comme normal ou bien anormal [Combacau *et al.*, 2000]. Cette fonction consiste à analyser l'état du système de production et à déterminer si cet état est en tout instant conforme aux objectifs et satisfait les contraintes du système de production. Si tel n'est pas le cas, alors le système de production est très probablement en présence d'une perturbation que le système de pilotage doit prendre en compte.

Dans le chapitre 1, nous avons vu que très peu d'architectures distribuées de pilotage ont été spécialement conçues pour assurer la détection des perturbations dans les systèmes de production [Odrey et Mejia, 2003]. Or c'est cette fonction qui permet de déclencher le processus de traitement des perturbations, d'où son importance.

Les notions de classification et de caractérisation des classes de perturbations précédemment introduites vont nous servir afin de détecter les états de fonctionnement anormaux d'un système de production et d'en déduire la présence de perturbations. Ici aussi, nous nous inspirons de la biologie.

En effet, en immunité biologique, la détection des pathogènes est assurée par les cellules APC. Grâce aux récepteurs PRR présents à leur surface, ces cellules sont capables d'identifier les caractéristiques génériques d'un pathogène (identification des motifs PAMPS présents à la surface des pathogènes), et de reconnaître la classe d'appartenance de ce pathogène.

Dans le contexte du pilotage, nous nous inspirons des cellules APC pour réaliser la fonction de détection des perturbations, de manière distribuée. Conformément à la classification des perturbations introduite précédemment, nous spécialisons un type de cellules APC par classe de perturbations. Plus précisément, on distingue les types de cellules APC de la Figure 3.13.

Lorsqu'une activité de production se déclenche, la cellule artificielle qui lui est associée envoie ses spécifications aux cellules APC. Ces dernières se chargent alors de surveiller l'occurrence d'évènements pouvant nuire à la réalisation des spécifications des activités en cours. Pour ce faire, les cellules associées aux activités continuent de mettre à jour les cellules APC avec leur état actualisé. Cet état peut être acquis depuis les systèmes d'information tels que le système MES, comme le montre la Figure 3.15.

Les spécifications reçues des cellules artificielles servent à limiter, au sein d'une cellule APC, un ensemble de PRR à surveiller. Comme on l'a vu précédemment, les PRR reflètent les objectifs, les paramètres et/ou les indicateurs qui caractérisent un fonctionnement normal du système de production.

Tant que les activités de production sont en cours d'exécution, les cellules APC confrontent les états actualisés reçus des cellules aux PRR. Les états actualisés des cellules reflètent les paramètres mesurés et les indicateurs calculés du système de production.

Lorsque l'état actualisé d'une cellule viole un PRR, la cellule APC utilise la classification des perturbations et vérifie la caractérisation de chaque classe pour déduire la classe de la perturbation. La classe de la perturbation possède le PAMP qui correspond au PRR violé. Les

cellules APC lancent alors un pathogène dans le système, signalant la présence d’une perturbation.

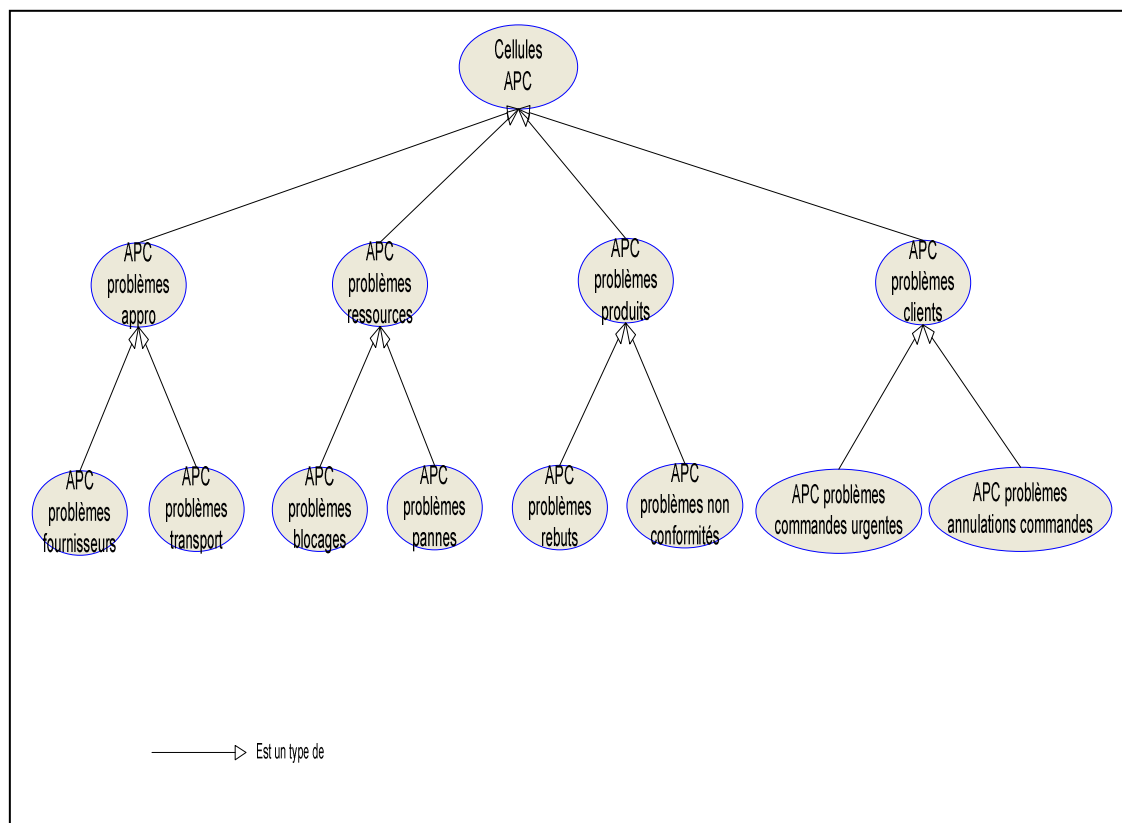


Figure 3.13: Types de cellules APC.

Le **Tableau 3.8** explique les rôles des cellules APC de la **Figure 3.13**.

Tableau 3.8: Types de cellules APC.

Cellule APC	Description
APC/ problèmes fournisseurs	APC dédiée à la détection des perturbations liées aux problèmes de production des fournisseurs
APC/ problèmes transports	APC dédiée à la détection des perturbations liées aux problèmes d’acheminement des articles approvisionnés des sites des fournisseurs vers le système de production
APC/ problèmes blocages	APC dédiée à la détection des problèmes de blocage des ressources
APC/ problèmes pannes	APC dédiée à la détection des problèmes de pannes des ressources
APC/ problèmes rebuts	APC dédiée à la détection des problèmes de rebuts
APC/ problèmes non-conformités	APC dédiée à la détection des problèmes de non conformités
APC/ commandes urgentes	APC dédiée à la prise en charge de commandes urgentes
APC/ annulations de commandes	APC dédiée à la prise en charge d’annulations de commandes

En créant et en lançant un pathogène dans le système, une cellule APC renseigne les antigènes de ce pathogène. Ces antigènes sont des attributs qui permettent de décrire la perturbation, entre autres en termes de temps, de coûts et de qualité, comme l'illustre la **Figure 3.14**.

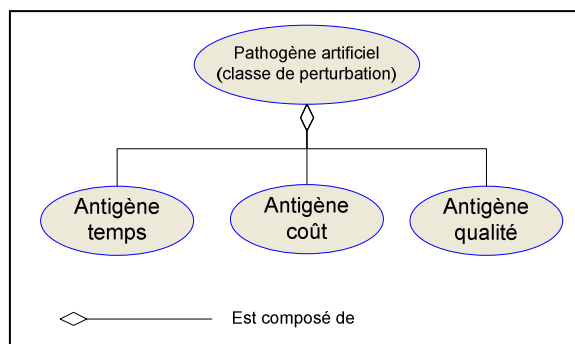


Figure 3.14: Description d'un pathogène.

Afin de renseigner les antigènes d'un pathogène, les cellules APC peuvent consulter l'historique des rencontres avec des perturbations identiques ou similaires à la nouvelle occurrence d'une perturbation. Aussi, les cellules APC peuvent solliciter des experts ou bien des systèmes spécialisés tels que des systèmes de diagnostic, pour mieux caractériser une perturbation.

Par exemple, le **Tableau 3.9** illustre quelques exemples de perturbations en donnant, ligne par ligne, un pathogène et les antigènes qui lui sont associés. Dans le cas des pannes des ressources, les paramètres et les réglages non – conformes, qui représentent l'antigène qualité, peuvent correspondre aux mesures acquises à partir du système de production et ayant servi à détecter la perturbation. Dans ce cas, l'antigène temps et l'antigène coût correspondent à des valeurs estimées par la cellule APC dédiée à la détection des perturbations de type panne ressource. Cette cellule peut consulter l'historique des pannes similaires ou identiques pour avoir une estimation de la durée de la nouvelle occurrence de la panne.

Tableau 3.9: Quelques exemples de pathogènes et d'antigènes associés.

Pathogène	Antigènes		
	Temps	Qualité	Coût
Panne ressource	Durée de la panne	Paramètres ou réglages conformes non conformes	Coût d'immobilisation
Retard d'approvisionnement	Durée du retard	Péréemption d'articles (due aux conditions ou à la durée de stockage)	Frais supplémentaires (stockage, transport, ...)
Problème qualité de l'article approvisionné	Durée du retard	Paramètres non-conformes	
Hausse du prix d'un article approvisionné			Prix en hausse

La **Figure 3.15** illustre l'interaction entre un système MES, une cellule artificielle et une cellule APC, permettant d'aboutir à la détection de pathogènes comme expliqué ci haut.

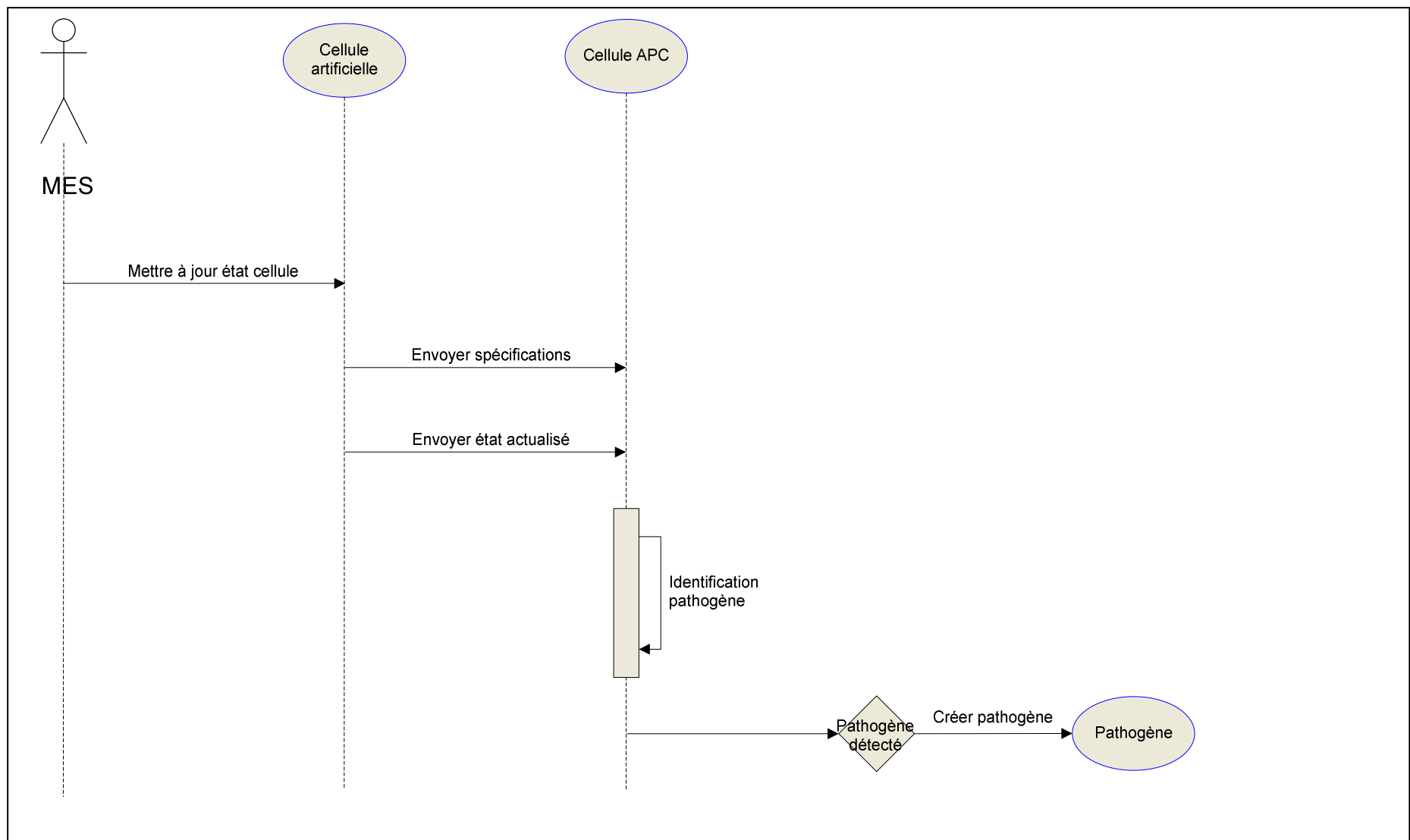


Figure 3.15: Détection de pathogènes.

3.7. Identification des conséquences des perturbations

La détection des perturbations permet une prise de conscience des événements qui menacent le système de production. Cette prise de conscience est une étape nécessaire mais pas suffisante dans le traitement des perturbations. En effet, il est tout aussi nécessaire de déterminer les conséquences de la perturbation sur le système de production afin de leur prévoir les traitements adéquats. L'immunité biologique peut nous aider dans ce sens.

Lorsqu'une cellule APC artificielle détecte une perturbation, elle crée et lance dans le système un pathogène tout en renseignant ses antigènes temps, coût et qualité. Comme l'illustre la [Figure 3.16](#), le pathogène créé diffuse ses antigènes et agresse des cellules artificielles représentant des entités du système de production.

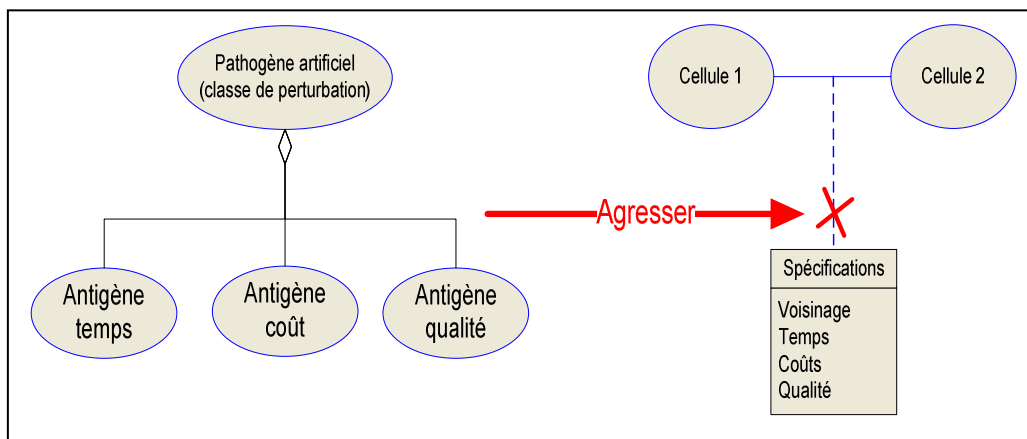


Figure 3.16: Illustration d'un pathogène agressant une cellule.

Chaque cellule artificielle associée à une entité du système de production est sensible aux antigènes diffusés par un pathogène. Chaque cellule artificielle prend en charge de déterminer les conséquences directes ou probables de chaque type d'antigène sur chaque lien de spécification.

Lorsqu'un lien de spécification est mis en danger par un antigène, la cellule artificielle diffuse un signal de danger vers les cellules de son voisinage pour signaler son agression. Ce signal de danger décrit la manière avec laquelle le lien de spécification a été modifié par l'antigène.

Chaque cellule artificielle est aussi réceptive aux signaux de danger. Lorsqu'une cellule détecte des signaux de danger diffusés par une cellule dans son voisinage, elle vérifie si ces signaux de danger menacent ses liens de spécification. Dans l'affirmative, la cellule détermine sa part du danger et le diffuse à son tour dans son voisinage.

La [Figure 3.17](#) illustre l'interaction entre pathogène et cellules artificielles permettant de propager l'agression et de déterminer l'ensemble des dangers dus à la perturbation.

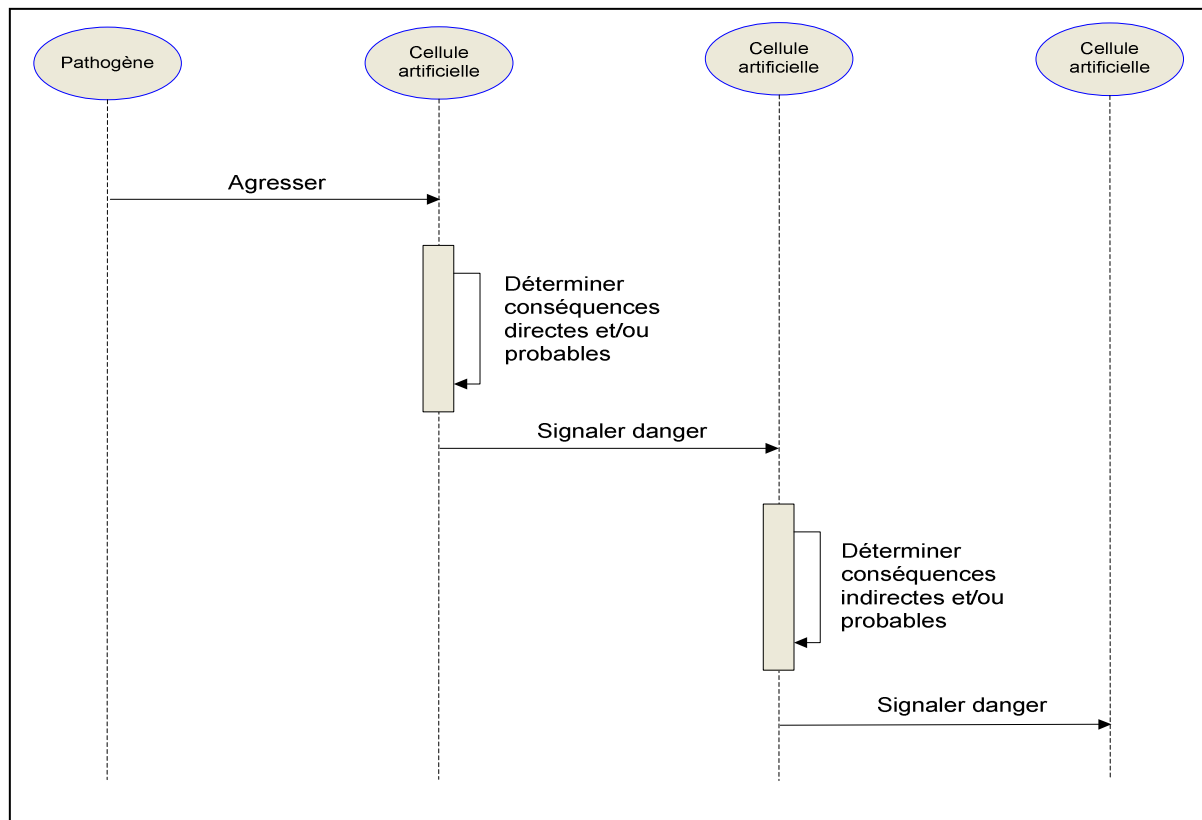


Figure 3.17: Propagation d'une perturbation par agression et diffusion de signaux de danger.

La [Figure 3.18](#) illustre un exemple d'identification des conséquences d'une perturbation de type panne machine. Dans cette figure, plusieurs cellules artificielles existent, parmi lesquelles nous distinguons :

- Une cellule ordre de fabrication associée à l'activité de production d'un article fabriqué
- Une cellule gamme associée à la gamme opératoire de l'article fabriqué
- Deux cellules opération 1 et opération 2 correspondant aux opérations de la gamme opératoire
- Deux cellules machine M1 et machine M2 associées aux machines sur lesquelles les opérations de gamme seront exécutées

Pour simplifier, ces cellules sont reliées entre elles par un tissu artificiel de spécifications de temps. La spécification de temps entre l'ordre et la gamme précise la date de lancement de l'ordre dans l'atelier et sa date d'échéance. Les spécifications de temps entre la gamme et les opérations, ainsi qu'entre les opérations et les machines, précisent les dates de début et de fin d'exécution des opérations sur les machines telles qu'établies par un ordonnancement initial.

Un pathogène représentatif de la panne machine M1 est introduit dans le système. Ce pathogène diffuse son antigène temps parmi les cellules artificielles du système. Cet antigène correspond à l'intervalle de temps pendant lequel la machine M1 tombe en panne et donne la durée de la panne.

L'antigène temps agresse la cellule artificielle associée à l'opération 1, dont l'exécution est justement prévue sur la machine perturbée M1. Cet antigène affecte le lien de spécification de temps qui lie l'opération à la machine en panne. La cellule opération 1 diffuse alors un signal

de danger (signal **Danger 1**) décrivant la modification de la spécification de temps mise en danger (modification des dates de début et de fin initialement prévues pour l'opération 1).

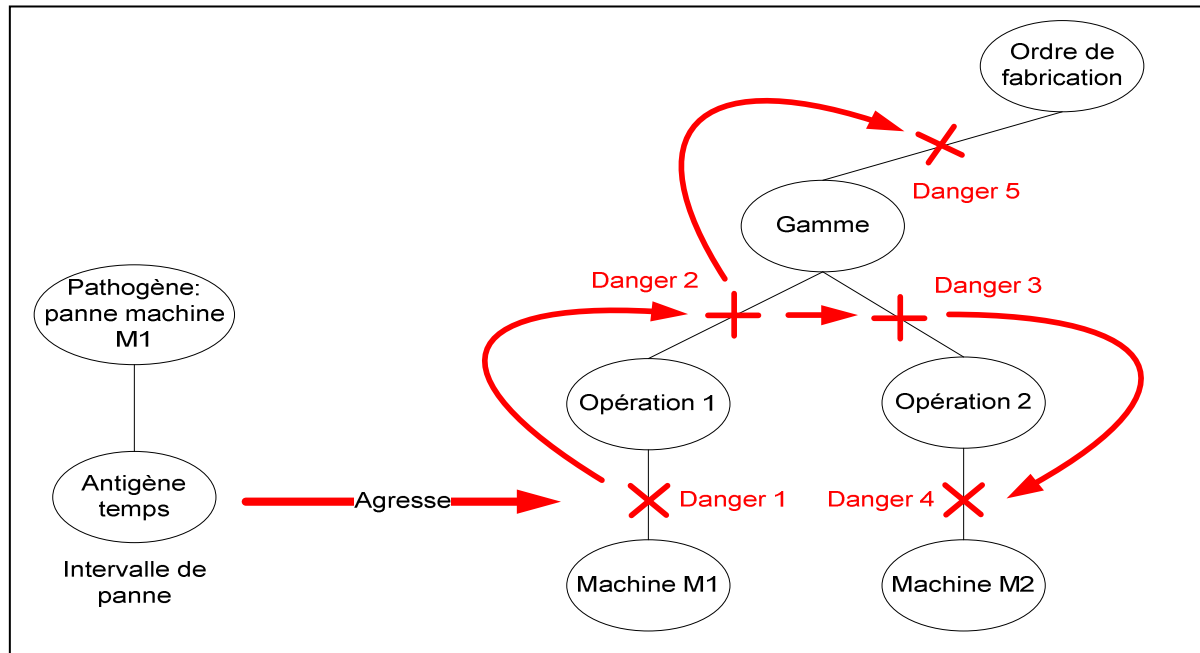


Figure 3.18: Identification des conséquences d'une perturbation.

Ce signal de danger est perçu par la cellule artificielle associée à la gamme opératoire de l'article fabriqué. Il met directement en danger le lien de spécification de temps qui lie la cellule gamme à la cellule opération 1. La cellule gamme génère alors le signal de danger (**Danger 2**) pour tenir compte de cette modification.

Ensuite, la cellule gamme détermine la conséquence du signal (**Danger 1**) sur le lien (de spécification de temps) avec la deuxième opération de la gamme. Au cas où la marge entre les deux opérations de gamme est insuffisante, ce lien est affecté. Dans ce cas, la cellule gamme émet un signal de danger (signal **Danger 3**).

Le signal **Danger 3** est perçu par la cellule associée à la deuxième opération 2. Cette cellule détermine la conséquence de ce signal sur le lien de spécification de temps qui la lie avec la cellule machine M2 et génère le signal de danger (**Danger 4**) pour signaler la modification de ses dates de début et fin d'exécution prévues.

La cellule associée à l'ordre de fabrication perçoit les signaux **Danger 2** et **Danger 3**. Dans le cas où ces signaux affectent la date d'échéance de l'ordre, la cellule ordre génère le signal de danger (**Danger 5**).

Ainsi, la propagation des signaux de danger permet de déterminer les conséquences directes et probables de la panne de la machine sur les cellules artificielles associées aux entités du système de production. Dans un but de simplification, cet exemple montre les conséquences de la perturbation uniquement sur les spécifications de temps des cellules. Le même principe permet de tenir compte des conséquences sur les autres spécifications de qualité, de coût, ...

Le **Tableau 3.10** permet de récapituler les signaux de danger générés par l'antigène.

Tableau 3.10: identification des conséquences d'une perturbation de type panne machine

Signal	Description
Antigène temps	Intervalle de temps pendant lequel la machine M1 tombe en panne
Danger 1	Modification des dates de début et de fin initialement prévues pour l'opération 1 sur la machine M1
Danger 2	Modification des dates de début et de fin initialement prévues pour l'opération 1 de la gamme
Danger 3	Modification des dates de début et de fin initialement prévues pour l'opération 2 de la gamme
Danger 4	Modification des dates de début et de fin initialement prévues pour l'opération 2 sur la machine M2
Danger 5	Modification de la date d'échéance de l'ordre

3.8. Réponse aux perturbations

Une fois une perturbation détectée et ses conséquences (directes, indirectes et probables) identifiées, il incombe au système de pilotage de trouver les décisions adéquates permettant d'y remédier. Grâce à l'étude des mécanismes déployés lors d'une réponse immunitaire, l'immunité biologique peut nous fournir des indications sur la manière d'organiser une réaction à une perturbation et à ses conséquences.

Dans cette section, nous examinons ces mécanismes de près. En premier lieu, nous examinons l'activation des cellules B, qui correspondent à des actions de pilotage simples ou composées. Ensuite, nous examinons l'activation des cellules mémoires, qui mémorisent et qui restituent des réactions à des occurrences précédentes de perturbations et de conséquences identiques ou similaires. Enfin, grâce à l'étude du fonctionnement des cellules Th, nous donnons quelques indications sur la manière de coordonner une réponse à la perturbation et à ses conséquences.

3.8.1. Activation des cellules B

Nous avons vu qu'en immunité biologique, les lymphocytes B sont stimulés par les signaux de danger pour capturer les antigènes présents dans le périmètre de danger. La capture d'un antigène a lieu dès que le lymphocyte B atteint un seuil d'activation. Ce seuil est fonction du degré d'affinité de ce lymphocyte avec l'antigène et de la concentration de l'antigène dans le périmètre de danger.

Les lymphocytes B activés décomposent les antigènes capturés, associent les fragments d'antigènes à des molécules dites MHC (pour « *Major Histocompatibility Complex* ») et présentent ces molécules à leur surface pour les communiquer aux lymphocytes Th. Cette présentation antigénique signale aux lymphocytes Th que les lymphocytes B ont identifié une anomalie et que ces lymphocytes B ont la possibilité de libérer des anticorps pour éliminer les antigènes responsables de la menace. Il appartient alors aux lymphocytes Th de confirmer ou d'infirmer l'activation de ces lymphocytes B.

Dans le contexte du pilotage, les cellules B représentent des actions de pilotage simples ou composées. Dans les deux sections suivantes, nous présentons ces deux types de cellules B.

3.8.1.1. Cellules B simples

Les cellules B simples sont des actions élémentaires (non composées) de pilotage, telles que « trouver un fournisseur de substitution », « trouver un article de substitution », « trouver un sous traitant », « réaffecter une opération d'une ressource à une autre », « re séquencer une opération sur une ressource », etc.

Une cellule B simple est sensible à la fois aux antigènes (temps, coût et qualité) libérés par les pathogènes, et aux signaux de danger libérés par les cellules affectées. Les antigènes et les signaux de danger permettent ainsi de recruter, parmi l'ensemble des actions de pilotage disponibles, celles qui sont capables d'intervenir sur la perturbation et de pallier à ses conséquences.

La **Figure 3.19** illustre l'interaction entre un pathogène et une cellule artificielle permettant d'activer une cellule B simple pour faire des propositions de pilotage.

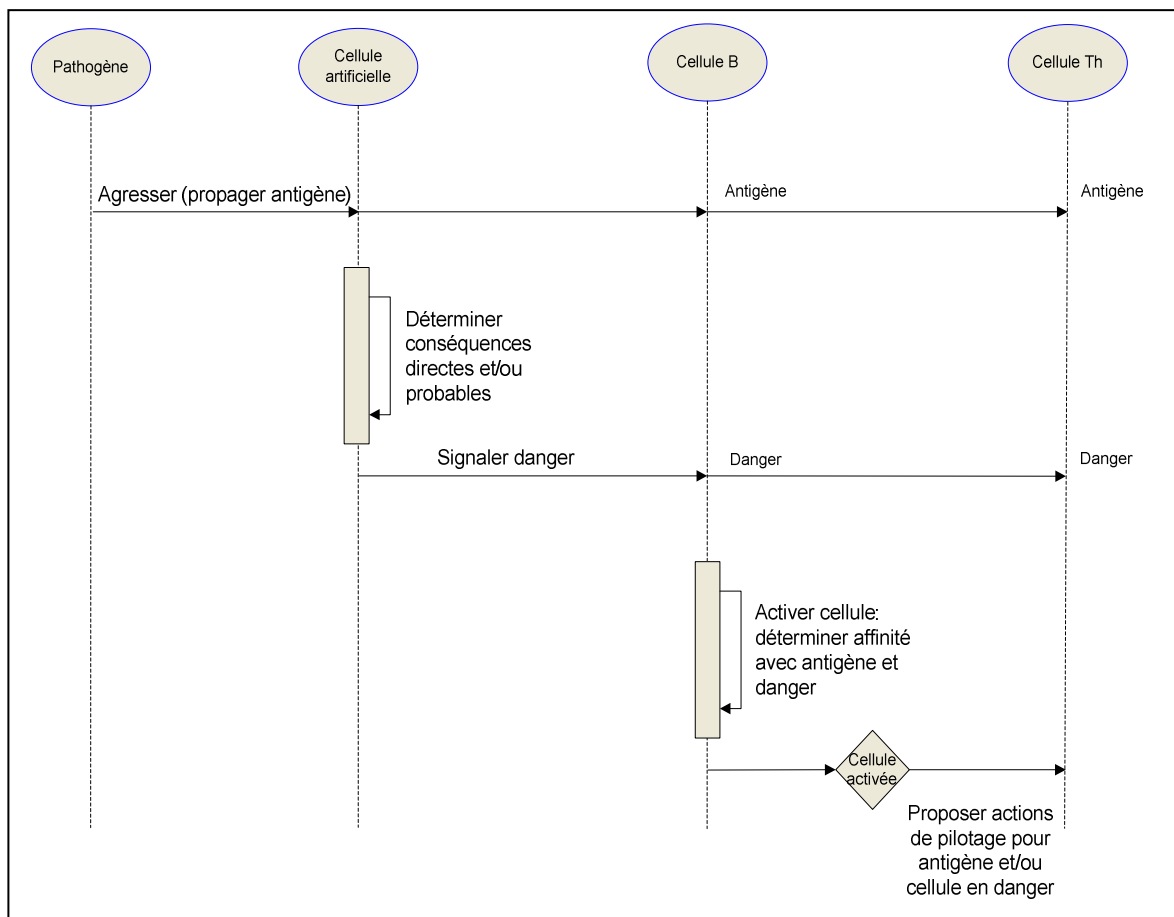


Figure 3.19: Formalisation des interactions conduisant à l'activation d'une cellule B.

Pour qu'une cellule B simple soit recrutée et participe dans le traitement de la perturbation, il faut qu'elle soit activée. Cette activation a lieu dès que le niveau de stimulation de la cellule dépasse un seuil d'activation. Ce niveau de stimulation est fonction de l'affinité entre la cellule B et les antigènes et/ou les signaux de danger perçus.

La fonction d'affinité reflète :

- La compétence de la cellule B à traiter la perturbation et/ou le signal de danger,
- Le degré de gravité de la perturbation,
- L'existence d'alternatives dans le système de production,
- La faisabilité de l'action compte tenu du contexte dans lequel le système de production se trouve au moment de l'occurrence de la perturbation.

Ainsi, par exemple, l'action « *trouver une nomenclature de substitution* » n'est pas compétente pour traiter la perturbation « *panne machine* ». Cette perturbation, par contre, est plus du domaine de compétence des actions « *réparer ressource en panne* » et « *trouver une machine de substitution pour les tâches affectées* ».

Dans les cas où il n'existe pas de machine alternative (à celle en panne) vers laquelle réorienter les tâches affectées, ou qu'une machine alternative existe mais n'est pas disponible, alors l'action « *trouver une machine de substitution* » n'est pas faisable. Bien qu'elle soit compétente pour intervenir en cas de panne, cette action ne peut être activée.

Plus exhaustivement, le **Tableau 3.11** illustre quelques exemples de cellules B simples ainsi que les concepts de compétence, de faisabilité et de contexte nécessaires à leur activation.

Tableau 3.11: Exemples de cellules B simples et de concepts associés à leur activation.

Affinité	Cellules B simples	
	Substituer fournisseur	Réaffecter opération
Antigènes	Problèmes des fournisseurs Problèmes de transport	Problèmes de ressources
Dangers	Articles en retard d'approvisionnement (ordres d'achat en retard) Problèmes qualité : non-conformité des articles approvisionnés	Opérations bloquées ou suspendues Opérations en retard
Faisabilité de l'action	Existence d'un fournisseur de substitution pour l'article avarié	Existence de ressources de substitution pour les opérations affectées
Contexte	Délais, coût et qualité du produit du fournisseur de substitution compatibles avec les exigences du système de production	Disponibilité des ressources de substitution en fonction de leur état d'occupation Les ressources de substitution satisfont les exigences de coût et de qualité des opérations affectées

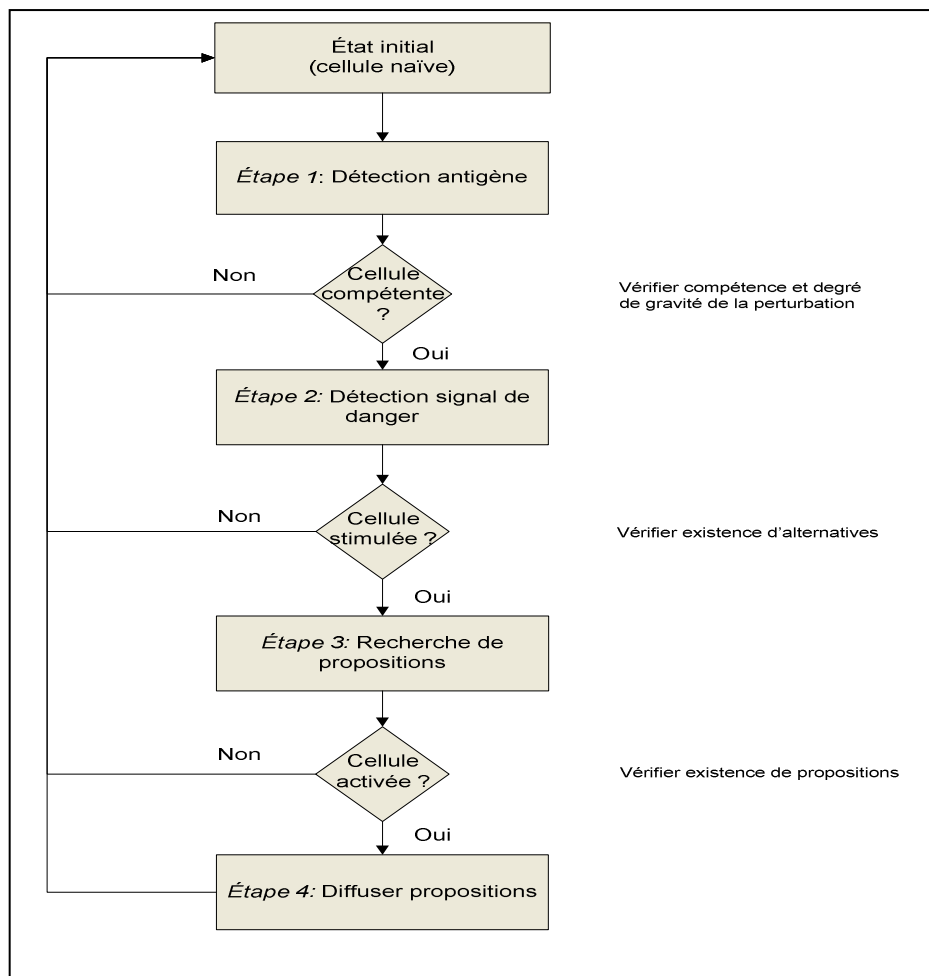


Figure 3.20: Algorithme de recrutement d'une cellule B simple dans le traitement d'une perturbation.

Dans le cas général, le synoptique de la [Figure 3.20](#) permet de décrire les étapes conduisant à l'activation d'une cellule B.

Initialement, la cellule est au repos (état naïf). Suite à la détection de la présence d'antigènes (*étape 1*), la cellule vérifie si elle est compétente pour intervenir sur cette perturbation et si la gravité de la perturbation est compatible avec l'action de la cellule. Dans l'affirmative, la cellule reste réceptive à la présence de signaux de danger.

Suite à la détection de signaux de danger (*étape 2*), la cellule vérifie, dans les systèmes d'information de l'entreprise (ERP par exemple), l'existence d'alternatives (ressources, gammes, nomenclatures, fournisseurs, sous traitants) pour les cellules artificielles affectées. Dans l'affirmative, la cellule procède à l'examen des alternatives existantes (*étape 3*) afin de chercher des propositions permettant d'éliminer ou de réduire l'antigène et/ou le signal de danger.

Dans le cas d'une perturbation de type « *panne machine* » par exemple, cette recherche de propositions consiste à trouver des fenêtres de temps sur des ressources de substitution pour exécuter des tâches affectées (cellule B « *Réaffecter* »), ou à trouver des sous traitants capables d'effectuer à temps les tâches perturbées (« cellule B « *Sous traiter* »).

Lorsque de telles propositions sont trouvées, la cellule B correspondante est activée. Elle diffuse alors ses propositions (*étape 4*) aux cellules Th.

Le **Tableau 3.12** illustre des cellules B simples stimulées par l'antigène et chaque signal de danger de la **Figure 3.18**. Ce tableau explique le rôle de chaque action de pilotage correspondant à une cellule B simple. Nous expliciterons l'utilisation de ces actions dans le paragraphe consacré au rôle des cellules Th.

Tableau 3.12: Activation de cellules B simples dans le cas d'une panne machine

Signal	Cellule B simple	Description
Antigène temps	B1 : Réparer machine	Faire appel à la maintenance corrective pour réparer la panne machine (lancer un ordre de maintenance)
Danger 1	B2 : Reséquencer	Modifier les dates de début et de fin d'exécution de l'opération sur la même machine
	B3 : Réaffecter	Affecter l'opération à une autre machine équivalente
	B4 : Supprimer lien	Supprimer le lien entre l'opération et la machine
Danger 2	B2 : Reséquencer	Modifier les dates de début et de fin d'exécution de l'opération de gamme
	B6 : Sous traiter opération	Trouver un sous traitant capable d'exécuter l'opération
	B4 : Supprimer lien	Supprimer le lien entre la gamme et l'opération
	B7 : Ne rien faire	Ne rien modifier dans le lien
Danger 3	B2 : Reséquencer	Modifier les dates de début et de fin d'exécution de l'opération de gamme
	B6 : Sous traiter opération	Trouver un sous traitant capable d'exécuter l'opération
	B4 : Supprimer lien	Supprimer le lien entre la gamme et l'opération
	B7 : Ne rien faire	Ne rien modifier dans le lien
Danger 4	B2 : Reséquencer	Modifier les dates de début et de fin d'exécution de l'opération sur la même machine
	B3 : Réaffecter	Affecter l'opération à une autre machine équivalente
	B4 : Supprimer lien	Supprimer le lien
	B7 : Ne rien faire	Ne rien modifier dans le lien
Danger 5	B2 : Reséquencer	Modifier ou mettre à jour les dates de début et de fin prévues pour la gamme
	B9 : sous traiter gamme	Trouver un sous traitant pour fabriquer l'article
	B7 : Ne rien faire	Ne rien modifier dans le lien

3.8.1.2. Cellules B composées

Une cellule B composée représente une action de pilotage formée de la combinaison de plusieurs actions de pilotage élémentaires. Une telle cellule sert par exemple à remplacer une activité par plusieurs activités équivalentes ou à subdiviser une activité en plusieurs activités.

Une cellule B composée est sensible aux antigènes, aux signaux de danger et aux propositions des cellules B simples qui composent son action. La **Figure 3.21** illustre les interactions conduisant à l'activation d'une telle cellule.

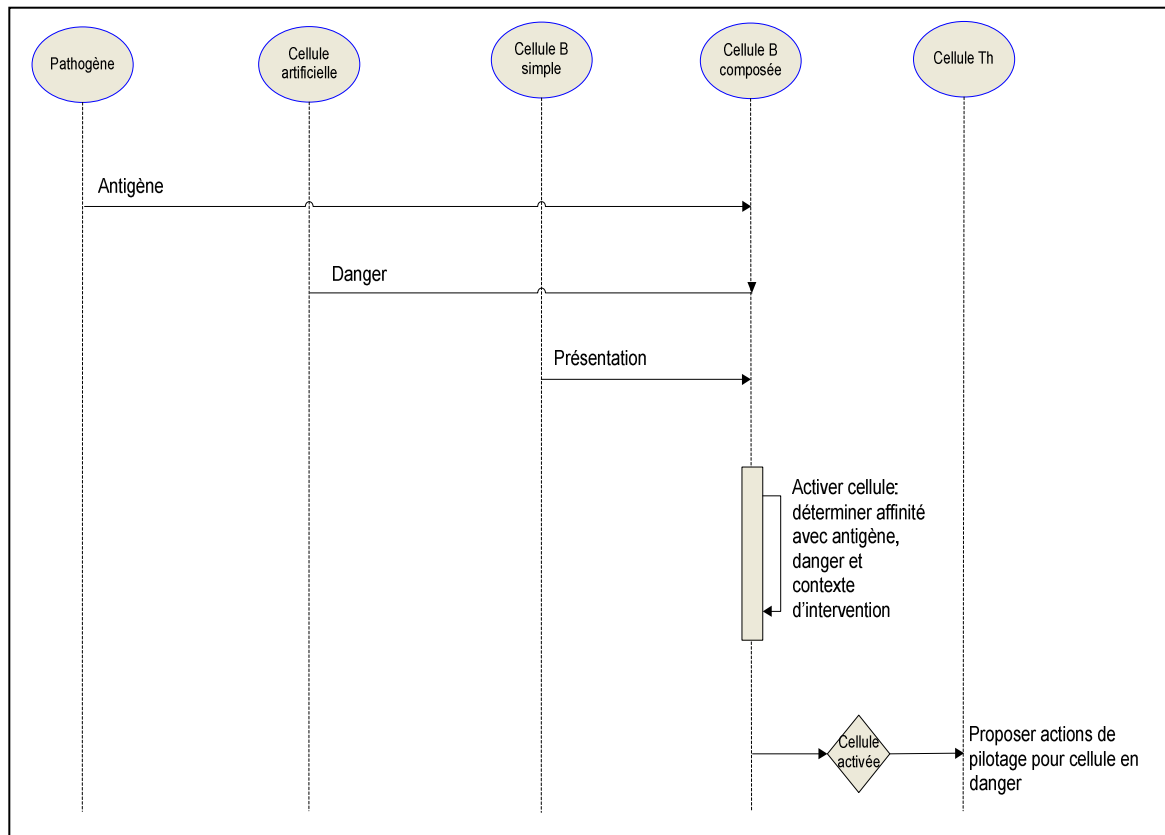


Figure 3.21: Interactions pour l'activation d'une cellule B composée.

L'algorithme de recrutement d'une cellule B composée dans le traitement d'une perturbation reste semblable à celui de la **Figure 3.20**, mais avec une légère modification qui concerne la stimulation de la part des cellules B simples.

Cette modification est illustrée par le synoptique de la **Figure 3.22**. Dans l'étape 1, la cellule est sensible à la présence d'antigènes. Dans l'étape 2, la cellule est sensible à la présence de signaux de dangers. Dans l'étape 3, la cellule est réceptive à la présence de propositions de la part des cellules B simples composant son action complexe. Une cellule B composée ne sera pas activée si une des propositions des cellules B simples requises manque à l'appel (car cela voudra dire que l'alternative correspondante n'est pas disponible).

Etant données les propositions des cellules B simples, la cellule B composée essaye de les composer afin de formuler des propositions cohérentes. Si de telles propositions existent, la cellule B composée devient activée et communique les propositions trouvées aux cellules Th.

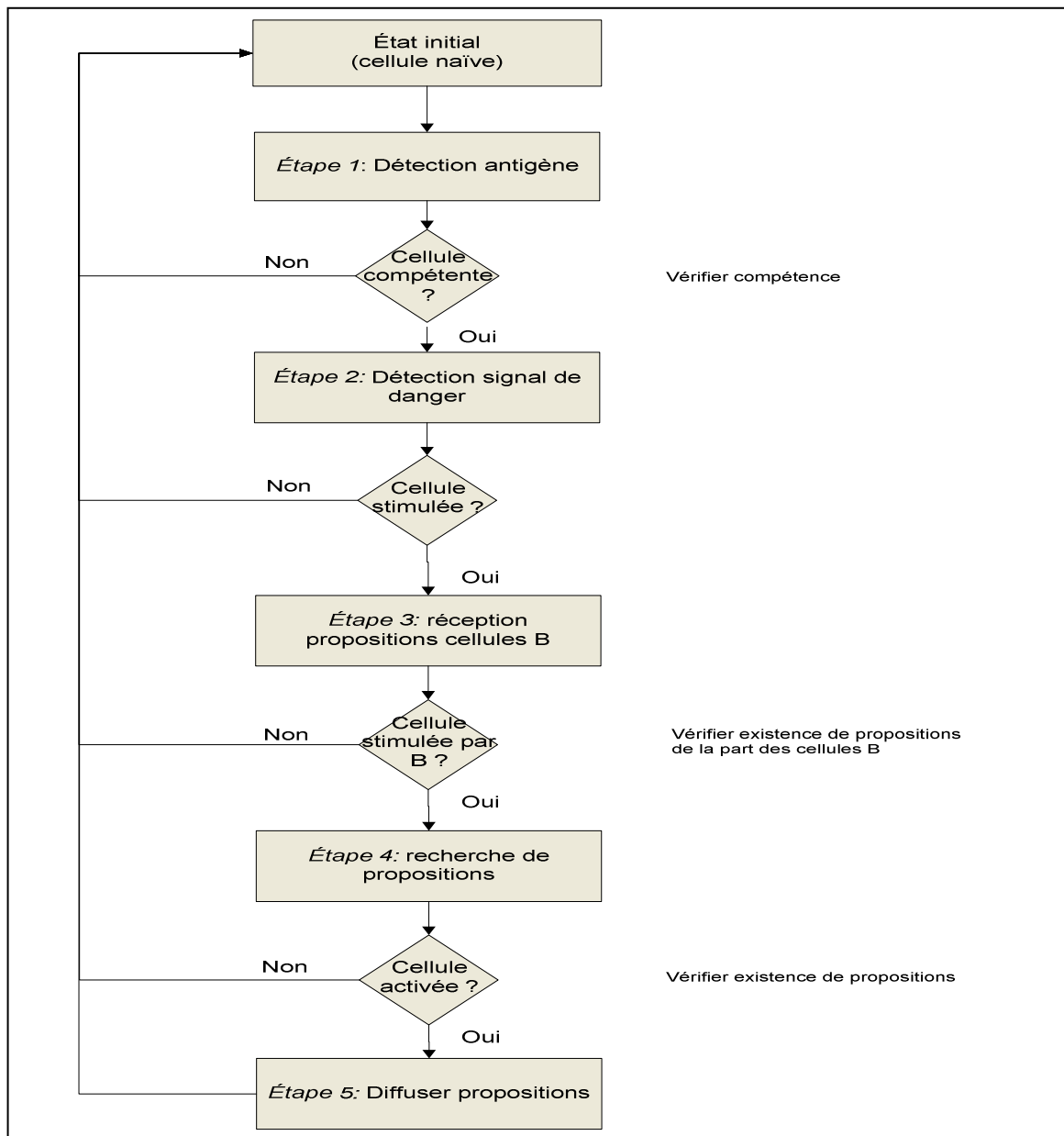


Figure 3.22: Algorithme de recrutement d'une cellule B composée dans le traitement d'une perturbation.

Par exemple, la Figure 3.23 illustre le résultat de l'intervention d'une cellule B composée « *Subdiviser opération* » effectuant une action combinée de reséquencement et de réaffectation dans le cas d'une perturbation de type « *panne machine* ».

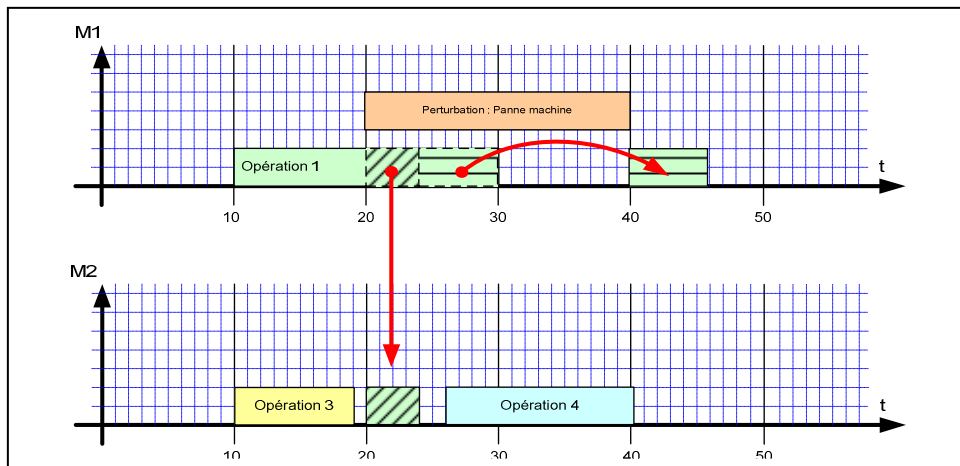


Figure 3.23: Illustration des actions de la cellule B composée « Subdiviser opération ».

Dans cet exemple, la machine M1 tombe en panne dans l'intervalle de temps [20, 40]. Or, sur cette machine, l'opération 1 a déjà été programmée pour s'exécuter dans l'intervalle [10, 30]. L'opération 1 est donc affectée par la perturbation sur l'intervalle [20, 30].

Parmi les actions de pilotage (cellules B) simples disponibles pour cette opération, on peut « réaffecter l'opération » vers une ressource de substitution, en l'occurrence la machine M2, ou bien « re séquencer l'opération » sur la machine M1, après réparation de cette dernière.

Or la machine M2 de substitution ne peut accueillir la totalité de la partie affectée de l'opération, mais seulement une partie. C'est dans ce contexte que la cellule B composée « Subdiviser opération » (« Split Operation ») intervient. Cette cellule permet de combiner les deux actions de réaffectation et de reséquencement de manière cohérente. Le résultat de l'action de la cellule consiste à réaffecter la partie qui peut être réaffectée de l'opération agressée vers la machine de substitution, et à reséquencer l'autre partie restante.

La **Figure 3.24** introduit une autre cellule B composée « Substituer opération » (« AltOperation »).

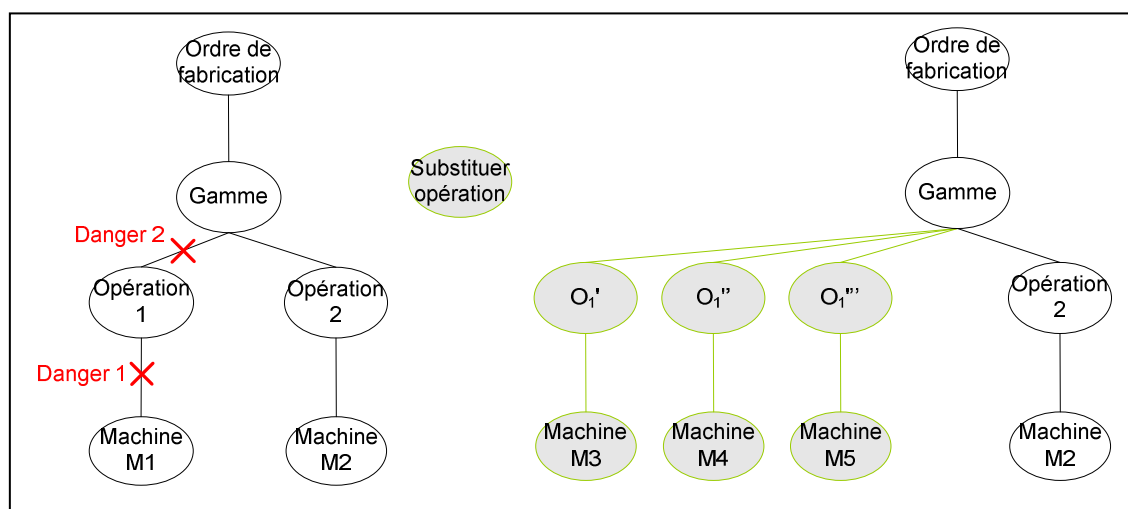


Figure 3.24: Illustration d'une cellule B composée de substitution d'une opération.

La cellule « *substituer opération* » est particulièrement sensible à des signaux de danger impliquant les liens entre une gamme et une de ses opérations (cf. signal **Danger 2** sur la **Figure 3.24**). Cette cellule permet de substituer une opération affectée par une ou plusieurs opérations équivalentes. Par exemple, une opération automatisée peut être remplacée par une ou plusieurs opérations manuelles équivalentes.

Un autre exemple d'une cellule B composée est celui permettant de « *substituer une gamme* » (« *AltRouting* »). La **Figure 3.25** permet d'illustrer l'action d'une telle cellule.

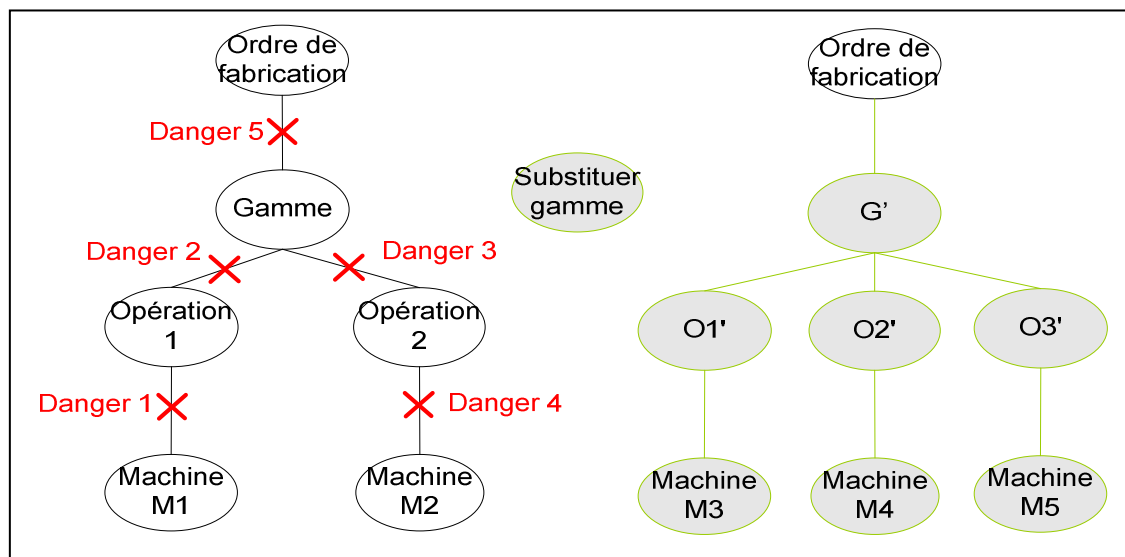


Figure 3.25: Illustration d'une cellule B composée de substitution d'une gamme.

La cellule B composée « *substituer gamme* » est particulièrement sensible à des signaux de danger impliquant les liens entre un ordre de fabrication et sa gamme (cf. signal **Danger 5** sur la **Figure 3.25**). Cette cellule permet de remplacer la gamme affectée par une gamme équivalente. Ceci revient à déprogrammer toutes les opérations de la gamme affectée et à les remplacer par les opérations de la gamme de substitution.

Ainsi, une cellule B composée permet d'apporter une réponse locale à une perturbation et/ou à ses conséquences en coordonnant localement l'action de cellules B simples disponibles.

3.8.2. Activation des cellules mémoires

Selon des théories biologiques, une cellule mémoire est un type particulier de cellule B capable de mémoriser des fragments d'antigènes. Dès la rencontre d'antigènes identiques ou similaires à ceux mémorisés, et en présence de signaux de danger, les cellules mémoires sont activées. Elles présentent aux cellules Th des molécules MHC (pour « *Major Histocompatibility Complex* ») pour leur dire qu'elles sont capables d'intervenir dans la réaction contre le pathogène et ses antigènes.

En pilotage, les cellules mémoires servent à mémoriser les caractéristiques des perturbations (antigènes), les conséquences de ces perturbations (signaux de danger), ainsi que les actions de pilotage ayant permis d'y réagir (propositions des cellules B simples et composées).

En présence d'une nouvelle occurrence d'antigènes et/ou de signaux de danger identiques ou similaires à ceux mémorisés, et en présence de propositions de cellules B activées de même type que les actions mémorisées, une cellule mémoire est activée et propose la réaction mémorisée aux cellules Th. Les interactions conduisant à l'activation d'une cellule mémoire sont présentées en [Figure 3.26](#).

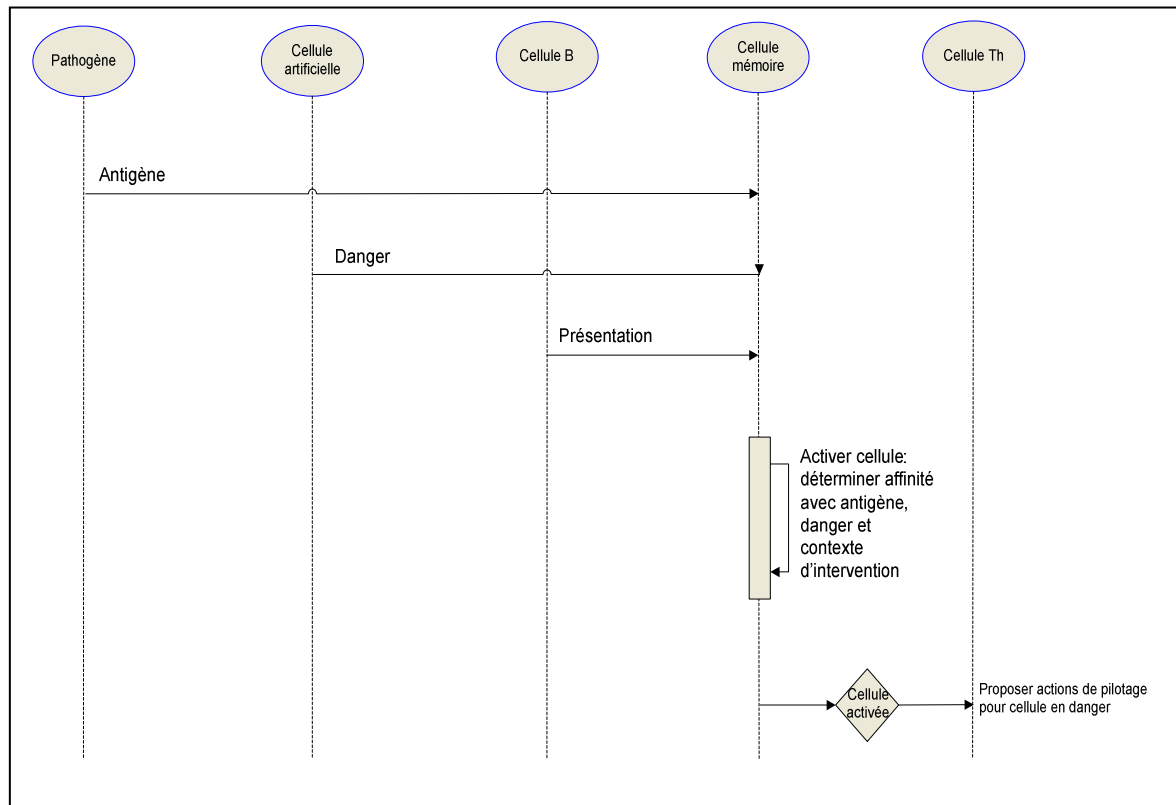


Figure 3.26: Interactions pour l'activation d'une cellule mémoire.

3.8.3. Rôle des cellules Th

Les cellules Th sont les cellules responsables de la coordination d'une « *réponse immunitaire* », c'est-à-dire une réaction à une perturbation et à ses conséquences. La [Figure 3.27](#) et la [Figure 3.28](#) illustrent les interactions d'une cellule Th avec les cellules de son environnement.

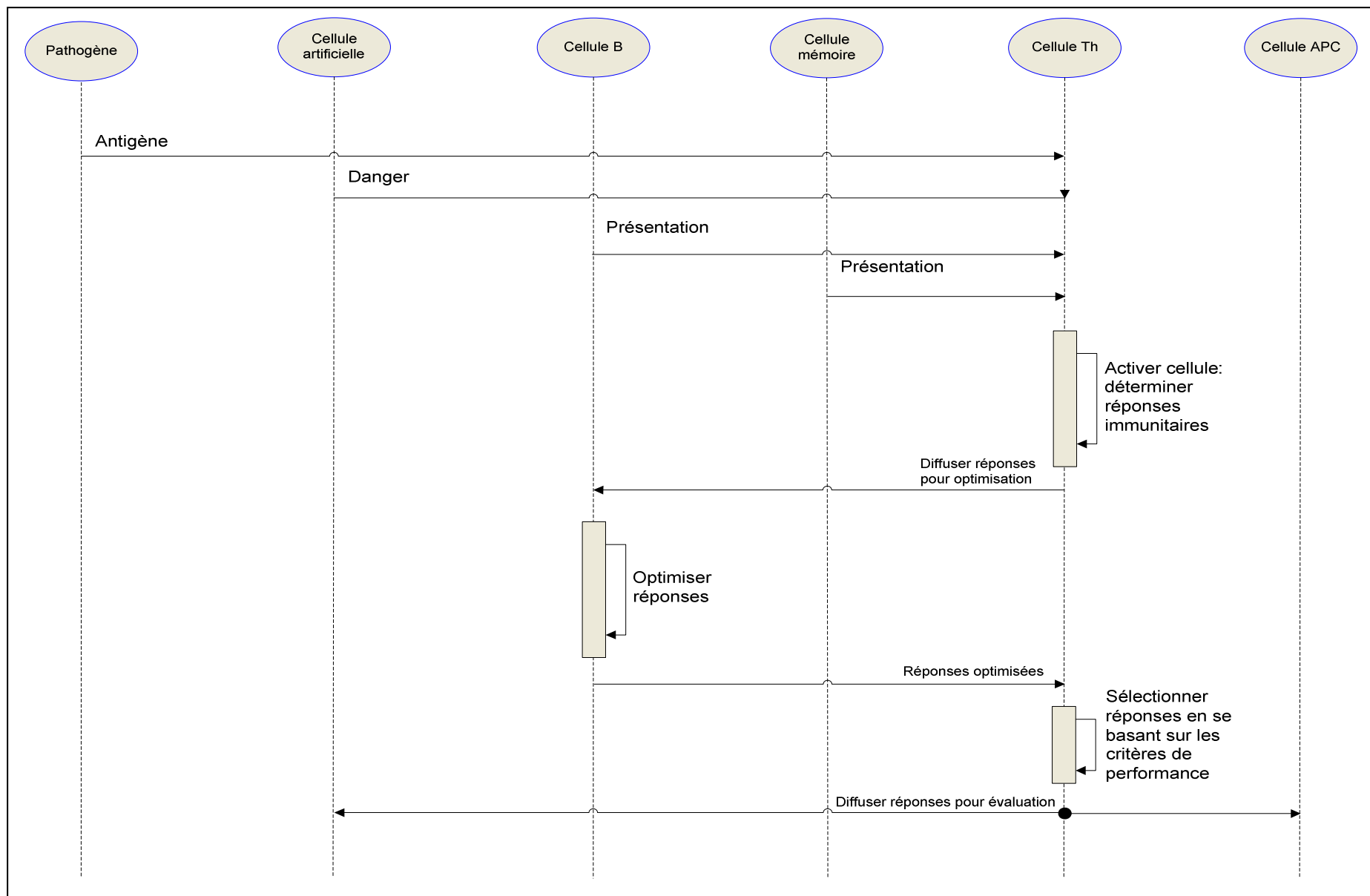


Figure 3.27: Principe d'activation d'une cellule Th.

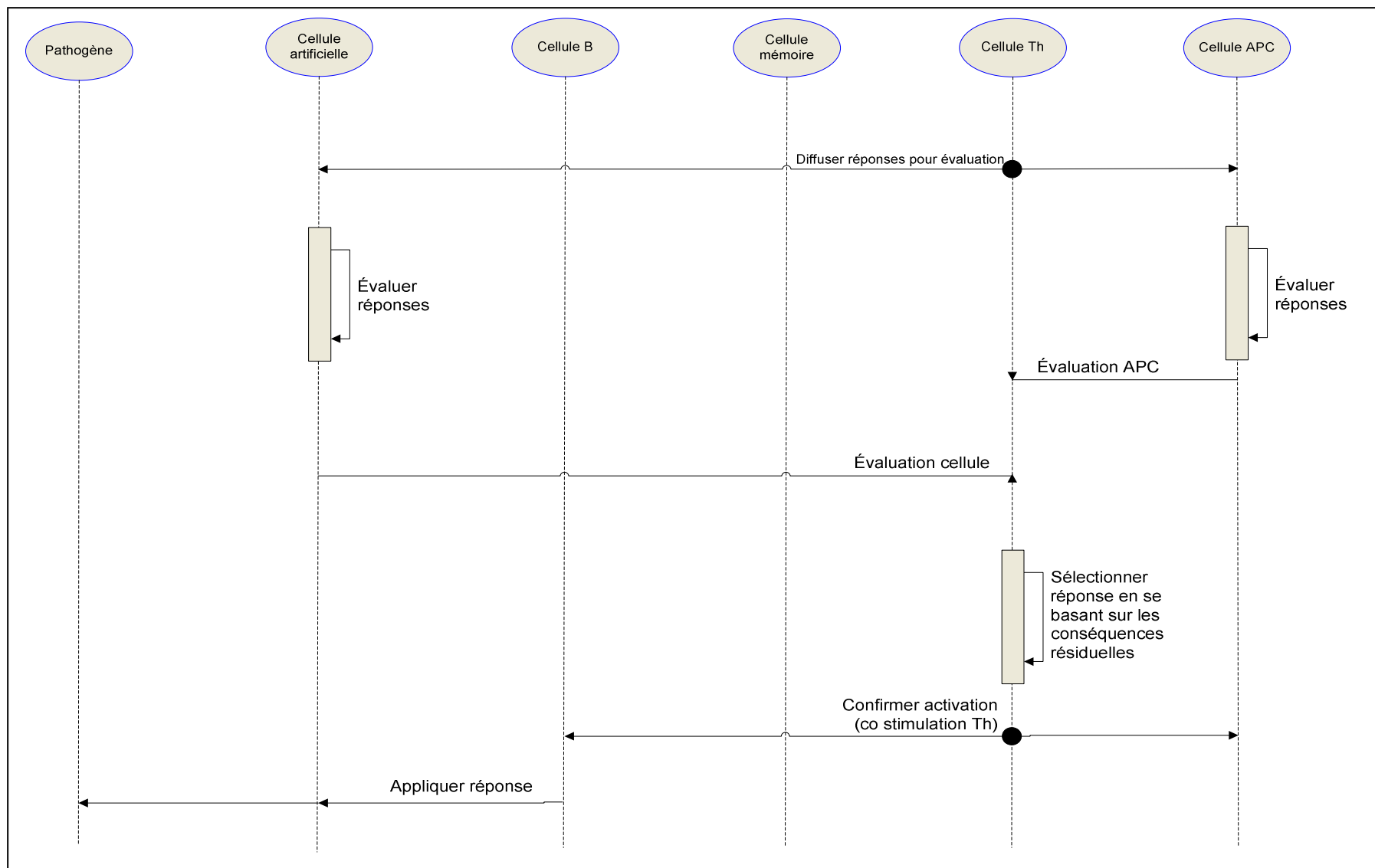


Figure 3.28: évaluation et application des réponses des cellules Th.

Une cellule Th est sensible :

- Aux antigènes libérés par les pathogènes (attributs d'une perturbation),
- Aux signaux de danger libérés par les cellules artificielles affectées (conséquences directes et probables d'une perturbation),
- Aux propositions des cellules B (actions de pilotage simples et composées)
- Aux propositions des cellules mémoires (réactions mémorisées).

Pour chaque antigène et signal de danger perçu, une cellule Th maintient un ensemble de propositions de cellules B et mémoire. La Figure 3.29 reprend l'exemple de la Figure 3.18 et montre l'ensemble des cellules B simples et composées stimulées pour intervenir sur l'antigène et chaque signal de danger.

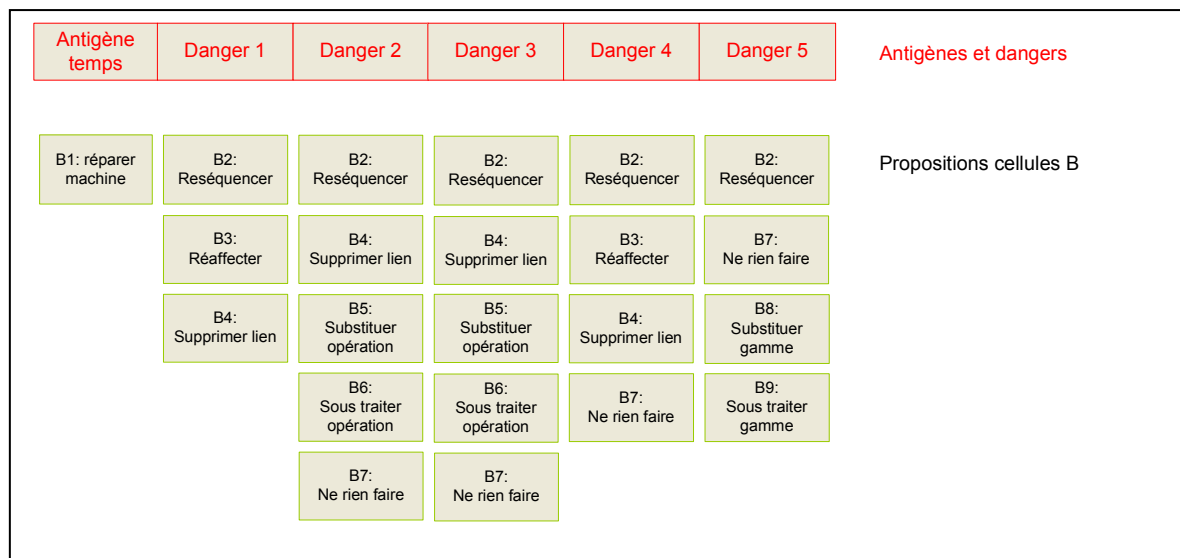


Figure 3.29: Activation de cellules B dans le cas d'une panne machine.

Une cellule Th devrait être munie de mécanismes lui permettant de sélectionner, pour chaque antigène et signal de danger, une parmi les propositions des cellules B et mémoire disponibles, et de combiner ces propositions de manière à obtenir une réponse cohérente. La Figure 3.30 reprend l'exemple de la Figure 3.18 et montre quelques exemples de cellules Th associées à des réponses contre la perturbation « *panne machine* » et ses conséquences.

La cellule Th1 illustre la réponse dans laquelle les deux opérations de gamme affectées sont réordonnées sur leurs machines respectives pour accommoder la perturbation. Appliquée aux signaux (**Danger 1**) et (**Danger 4**) de la Figure 3.18, l'action « *Reséquencer* » cherche des intervalles de temps sur la machine M1 pour exécuter l'opération 1 (directement affectée par la perturbation) et sur la machine M2 pour exécuter l'opération 2 (indirectement affectée par la perturbation). Le reséquencement sur les machines peut être effectué par exemple en décalant les opérations dans le temps de façon à accommoder la perturbation, ou en utilisant des heuristiques d'insertion.

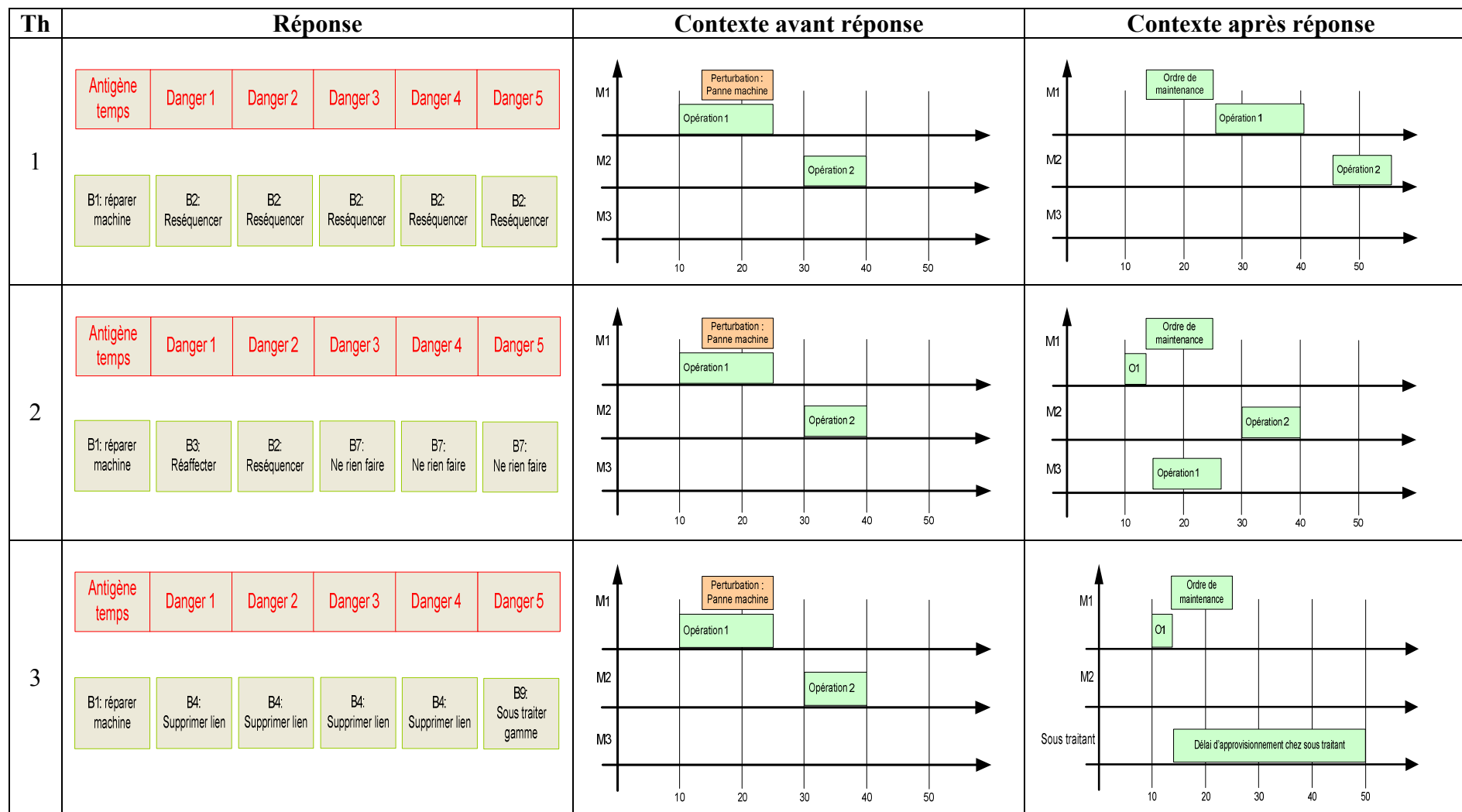


Figure 3.30: Illustration de quelques cellules Th.

Appliquée aux signaux (**Danger 2**) et (**Danger 3**), l'action « *Reséquencer* » met à jour les dates de début et de fin des opérations dans les liens de temps qui lient les opérations à la gamme. Enfin, appliquée au signal (**Danger 5**), l'action « *Reséquencer* » met à jour les dates de début et de fin prévues pour la gamme, en fonction des dates de la première et de la dernière opération de gamme.

La cellule Th2 illustre la réaction dans laquelle l'action « *Réaffecter* » est sélectionnée pour traiter le signal de danger (**Danger 1**). Dans ce cas, l'opération 1 (directement affectée par la panne) est réaffectée vers la machine M3 qui est équivalente à la machine M1, et qui est disponible au moment où la machine M1 tombe en panne. Avec l'action « *Réaffecter* », l'action « *Reséquencer* » prend en compte le signal (**Danger 2**) pour mettre à jour le lien de temps liant l'opération 1 à la gamme. La décision « *Ne rien faire* » est appliquée aux signaux (**Danger 3**), (**Danger 4**) et (**Danger 5**) parce que les actions « *Réaffecter* » et « *Reséquencer* » suffisent à éliminer la perturbation et sa conséquence sur l'opération 1. Du coup, l'effet de la perturbation sur l'opération 2 est éliminé.

La cellule Th3 illustre la réaction dans laquelle l'action « *sous traiter gamme* » est sélectionnée pour traiter le signal de danger (**Danger 5**). L'ordre de fabrication n'est donc plus lié à une gamme, mais plutôt à un ordre de sous-traitance, comme l'illustre la **Figure 3.31**. Pour les signaux de danger (**Danger 1**) à (**Danger 4**), l'action « *supprimer lien* » supprime les liens qui lient les machines aux opérations, et les opérations à la gamme, puisque ces liens ne sont plus nécessaires.

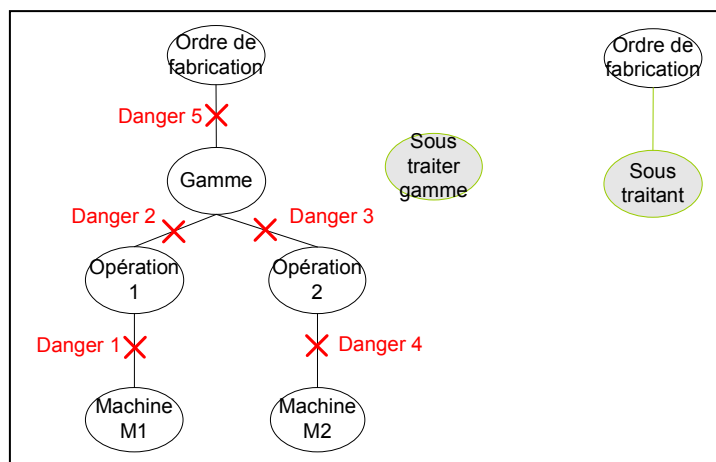


Figure 3.31: Illustration d'une cellule B simple permettant de sous-traiter une gamme de fabrication.

Les réponses des cellules Th sont ensuite envoyées aux cellules B pour les optimiser. Cette optimisation vise à instancier et à fixer définitivement les propositions des cellules B et mémoire contenues dans les réponses immunitaires de la cellule Th. Cette optimisation permet aussi de calculer des critères de performance pour évaluer la qualité des réponses.

Prenons l'exemple de la perturbation « *panne machine* » qui affecte plusieurs opérations de production (comme c'est le cas de la cellule Th1 de la **Figure 3.30**). Dans ce cas, la cellule B associée à l'action « *Reséquencer* » est stimulée par plusieurs signaux de danger émanant des cellules opérations affectées. Dans un premier temps, pour chaque signal de danger

impliquant une opération affectée, la cellule B propose un intervalle de temps pour réaffecter l'opération indépendamment des autres.

Or, dans le cas d'une réponse comme celle de la cellule Th1 de la [Figure 3.30](#) – où l'action « *Reséquencer* » est sélectionnée pour prendre en compte tous les signaux de danger – il devient nécessaire d'optimiser l'ordonnancement des opérations (touchées par la perturbation) sur les machines. Cette optimisation permet de mieux prendre en compte les contraintes de précedence entre les opérations, les contraintes de capacité des machines, et de déterminer la performance de la réponse selon un critère d'optimisation, par exemple la minimisation du temps de séjour dans l'atelier. Ensuite cette cellule B prend en charge la mise à jour des liens de temps entre les opérations et la gamme, et entre la gamme et l'ordre de fabrication.

En se basant sur l'évaluation de la performance des réponses immunitaires, les cellules Th devraient être munies de mécanismes leur permettant de sélectionner les réponses les plus performantes et de les communiquer aux cellules APC et aux cellules artificielles affectées. Ces cellules devraient être en mesure d'évaluer ces réponses en termes de conséquences résiduelles. En d'autres termes, les cellules APC devraient être capables de déterminer si une réponse sélectionnée suffit à éliminer la perturbation, et les cellules artificielles devraient être capables de déterminer si une réponse sélectionnée suffit à éliminer, ou du moins à réduire à des niveaux tolérables, les conséquences de la perturbation (signaux de danger).

Ainsi, les cellules Th disposent d'un ensemble de solutions évaluées en termes de performance et de conséquences résiduelles. Les cellules Th devraient être capables d'interagir entre elles pour sélectionner la cellule Th représentant la réponse qui a le meilleur compromis. La cellule Th sélectionnée devrait confirmer l'activation des cellules B pour réagir à la perturbation et ses conséquences, et co stimuler les cellules APC pour les inciter à assurer un suivi de la réponse. Finalement, la réponse associée à la cellule Th est stockée en tant que cellule mémoire.

3.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cherché à cerner les contributions potentielles de l'immunité biologique dans le domaine du pilotage de systèmes de production soumis à des perturbations. Etant donnée l'absence d'un algorithme immunitaire artificiel consensuel et l'absence d'approches immunitaires qui se sont particulièrement intéressées à notre domaine d'intérêt, nous avons développé notre propre démarche pour définir ce que pourrait être un système immunitaire artificiel pour le pilotage de systèmes de production en environnement perturbé.

Cette démarche consiste à établir des analogies structurelles et fonctionnelles entre l'immunité biologique et les systèmes de production. Ces analogies nous ont permis de dégager plusieurs contributions potentielles et de les adapter au contexte du pilotage de systèmes de production. Nous avons décliné ces contributions principalement en termes d'architecture, de mécanismes et de concepts. Ces contributions sont assez génériques pour permettre de prendre en compte une variété de types de perturbations.

Nous avons proposé une architecture distribuée de pilotage par les principes immunitaires. Cette architecture permet de réaliser des fonctions spécifiquement dédiées à la gestion des perturbations. Ces fonctions concernent la détection des perturbations, l'identification des conséquences directes, indirectes et probables d'une perturbation et la détermination de réponses aux perturbations. Ces fonctions sont distribuées sur un ensemble de composants

inspirés des cellules de l'organisme, des cellules de l'immunité innée (APC) et des cellules de l'immunité adaptative (B, Th et mémoire). Nous avons associé les cellules APC à des composants capables de détecter des événements nuisibles et de déterminer la classe de perturbation de tels événements. Nous avons associé les cellules B à des composants capables de proposer des actions de pilotage, les cellules Th à des composants capables d'élaborer des réponses à une perturbation et à ses conséquences et enfin, les cellules mémoires à des composants capables de mémoriser les perturbations et leur traitement.

Nous avons décrit des mécanismes destinés à assurer la coordination entre ces composants et ces fonctions. Parmi ces mécanismes, citons par exemple ceux d'activation sur affinité et de présentation antigénique. Le mécanisme d'activation sur affinité permet de déterminer et d'activer les actions de pilotage et les cellules mémoires les plus appropriées pour intervenir dans le traitement d'une perturbation et de ses conséquences. Nous avons associé le mécanisme de présentation antigénique à la proposition d'actions de pilotage pour les cellules B, et à la restitution de réactions mémorisées pour les cellules mémoires.

Nous avons enfin identifié un certain nombre de concepts immunitaires que nous avons adapté au contexte du pilotage de systèmes de production. Parmi ces concepts, citons particulièrement celui de pathogène que nous avons associé à une classification des perturbations, le concept d'antigène que nous avons utilisé pour caractériser une perturbation, et le concept de danger que nous avons associé aux conséquences directes, indirectes et probables d'une perturbation.

Toutefois, ce chapitre revêt un aspect fortement conceptuel dont le but est de présenter et d'argumenter l'idée d'un pilotage par les principes immunitaires, abstraction faite des technologies de réalisation possibles. Nous sommes conscients qu'afin de réaliser convenablement le rôle de chaque cellule, des adaptations spécifiques à chaque système de production sont nécessaires. Néanmoins, les principes présentés dans ce chapitre fournissent des éléments qui permettent d'envisager une meilleure structuration et organisation des connaissances relatives aux perturbations et aux outils permettant d'y réagir. Dans le prochain chapitre, notre attention sera portée sur le développement de ce point particulier. Nous nous intéresserons également aux questions relatives à la réalisation et à la mise en œuvre informatiques de nos propositions.

Chapitre 4 : Mise en œuvre des principes immunitaires pour le pilotage

RÉSUMÉ. L'immunité biologique peut contribuer en termes d'architecture, de mécanismes et de concepts, dans l'amélioration de la prise en compte des perturbations lors du pilotage de systèmes de production. Dans ce chapitre, nous examinons les questions relatives à la réalisation informatique de ces contributions. Nous nous y prenons en deux étapes. Dans la première étape, nous montrons que le paradigme des systèmes multi agents représente un cadre conceptuel compatible avec les propositions issues de l'immunité biologique. Dans le contexte du pilotage de systèmes de production, nous étudions dans quelle mesure l'immunité biologique permet d'enrichir ce cadre conceptuel avec des mécanismes spécifiquement dédiés à la gestion des perturbations. Pour ce faire, nous adoptons une démarche d'ingénierie multi agents pour spécifier un système de pilotage basé sur les principes immunitaires. Nous présentons les agents du système, nous décrivons leurs responsabilités et leurs interactions, et nous proposons un modèle de comportement générique pour chaque type d'agent. Dans la deuxième étape, nous nous concentrons sur la structuration et l'organisation des connaissances relatives aux perturbations. Cette étape représente une contribution importante de nos travaux. Nous proposons un modèle de connaissances basé sur une ontologie et destiné à mémoriser les perturbations, leurs conséquences ainsi que les actions ayant permis d'y réagir. Ce modèle permet d'atteindre trois objectifs. D'abord il sert à formaliser la communication entre les agents du système. Ensuite, il représente une base de connaissances qui permet à chaque agent d'interpréter les stimuli de son environnement et de s'acquitter de ses responsabilités. Il permet enfin d'acquérir des connaissances lors du traitement de perturbations afin de les réutiliser lorsque d'autres perturbations similaires ou identiques ont lieu.

4.1. Introduction

L'immunité biologique peut contribuer dans le pilotage de systèmes de production en termes d'architecture, de mécanismes et de concepts afin de mieux prendre en compte les perturbations. Dans le chapitre précédent, nous avons cherché à dégager aussi exhaustivement que possible ces contributions et à illustrer leur intérêt.

En ce qui concerne l'architecture distribuée de pilotage par les principes immunitaires, nous avons vu dans le premier chapitre que la distribution du pilotage des systèmes de production peut être réalisée grâce aux paradigmes de l'intelligence artificielle distribuée (IAD). Parmi ces paradigmes, les systèmes multi agents offrent à la fois un cadre conceptuel et une technologie de réalisation particulièrement adéquats pour la distribution des activités et des décisions de pilotage. Dans un premier temps, nous examinons dans quelle mesure les propositions qui découlent de l'immunité biologique sont compatibles avec le paradigme des systèmes multi agents, et comment il est possible d'exploiter cette technologie pour mettre en œuvre ces propositions.

Par ailleurs, l'étude menée dans le chapitre précédent laisse entrevoir que la mise en œuvre des propositions de l'immunité biologique nécessite un modèle de gestion des connaissances. Ce modèle régit notamment la manière avec laquelle chaque composant immunitaire perçoit son environnement, gère ses propres données et connaissances et interagit avec d'autres composants. Dans un deuxième temps donc, nous nous intéressons à la modélisation de ces connaissances ainsi qu'au choix d'un outil permettant de mettre en œuvre ce modèle, de capitaliser et de réutiliser ces connaissances.

L'objectif de ce chapitre consiste donc à montrer comment certaines des contributions de l'immunité biologique peuvent être mises en œuvre concrètement. Plus particulièrement, nous nous intéressons à la mise en œuvre de l'architecture distribuée de pilotage par les principes immunitaires, et nous nous concentrons sur la structuration et l'organisation des connaissances permettant de gérer les perturbations.

Pour ce faire, nous commençons par montrer que les systèmes multi agents représentent un paradigme compatible et convenable à la mise en œuvre des composants immunitaires. Ainsi, nous proposons un système multi agents pour le pilotage de systèmes de production soumis à des perturbations. Ce système est basé sur des composants et des principes immunitaires. Nous décrivons les fonctionnalités offertes par ce système, nous le situons par rapport à son environnement, et nous décrivons son architecture.

Plus particulièrement, nous associons un agent à chaque composant immunitaire et nous décrivons les responsabilités et les interactions de ces agents. Ensuite, nous présentons un aperçu de la modélisation du comportement de chaque composant.

Enfin, nous présentons un modèle de connaissances permettant d'une part de formaliser la communication entre les agents du système, et d'autre part d'acquérir et d'exploiter des connaissances lors du traitement de perturbations, afin de les réutiliser lorsque d'autres perturbations similaires ou identiques ont lieu. Nous proposons de réaliser ce modèle par une ontologie. Cet outil permet aux différents types d'agents cellules de gérer leurs connaissances sur eux mêmes et sur l'environnement dans lequel ils évoluent.

4.2. Compatibilité entre les principes immunitaires et le paradigme multi agents

Dans le premier chapitre, nous avons vu que plusieurs chercheurs et praticiens, confrontés aux problèmes de pilotage de systèmes de production, dirigent de plus en plus leurs efforts vers la conception de systèmes plus intelligents, autonomes et flexibles. Les systèmes multi agents ont été largement adoptés pour introduire de l'intelligence dans les systèmes de pilotage. En effet, les systèmes multi agents peuvent modéliser et résoudre des problèmes larges et complexes tout en introduisant de la flexibilité, de la modularité, de l'intelligence distribuée et une prise de décision décentralisée (Shen *et al.*, 2006).

Un système multi agent est un système de calcul distribué constitué de composants en interaction, nommés agents. Ces agents coordonnent leurs actions en vue de réaliser des tâches, soit conjointement, soit d'une manière compétitive (Tambe, 1998). Les agents sont souvent dotés de capacités de traitement de connaissances, de motivation et d'aptitudes uniques. Ils peuvent agir de manière autonome sur leur environnement en fonction d'une représentation partielle de cet environnement. Un agent perçoit de l'information, et utilise ses capacités de gestion des connaissances pour sélectionner et appliquer une de ses méthodes afin d'interagir avec la situation perçue. Une fois une décision prise, l'agent communique avec d'autres agents afin de leur permettre de se comporter en conséquence.

Malgré la généricité de leur cadre conceptuel, les systèmes multi agents n'offrent pas de concepts spécifiquement adaptés à la prise en compte et au traitement d'une variété de perturbations dans les systèmes de production. Dans le contexte du pilotage de tels systèmes, l'immunité biologique peut inspirer le développement de plusieurs types de cellules immunitaires artificielles (Darmoul *et al.*, 2008). Ces cellules peuvent être modélisées et développées par des agents en interaction pour mieux prendre en compte les perturbations. Chaque agent dans ce système immunitaire artificiel gère des connaissances qui lui sont propres, joue des rôles spécifiques et interagit avec d'autres agents d'une manière qui peut être décrite par le modèle Agent Groupe Rôle, AGR, (Ferber *et al.*, 1998).

Comme l'illustre la Figure 4.1, ce modèle repose sur trois concepts de base, qui sont l'agent, le groupe et le rôle. Un agent est spécifié comme une entité active communicante qui joue un ou plusieurs rôles au sein de groupes. Un groupe est une agrégation d'un ensemble d'agents. Un rôle est une représentation abstraite d'une fonction, d'un service ou d'une identification d'un agent au sein d'un groupe.

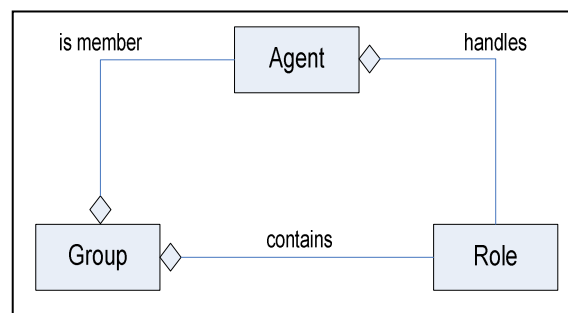


Figure 4.1: Modèle Agent Groupe Rôle (AGR) [Ferber *et al.*, 1998].

Dans les sections suivantes, nous entamons une démarche d'ingénierie logicielle afin de spécifier un système multi agents pour le pilotage de systèmes de production soumis à des perturbations, basé sur les principes immunitaires. Nous avons baptisé ce système ARTIMOS, comme « *ARTificial Immune MONitoring System* ». Nous donnons respectivement une vue macroscopique des fonctionnalités offertes par le système dans son intégralité à travers la spécification des cas d'utilisation. Nous décrivons les groupes d'agents en interaction, les accointances entre ces agents, ainsi que les rôles et les responsabilités de chaque agent.

4.3. Spécification d'un système immunitaire artificiel pour le pilotage basé sur le paradigme multi agents

Dans cette section, nous nous intéressons à la spécification du système ARTIMOS. Nous nous intéressons particulièrement aux fonctionnalités du système, aux interactions du système avec son environnement constitué des systèmes d'information et des décideurs humains et enfin aux interactions entre les agents qui forment le système.

4.3.1. Fonctionnalités du système

L'objectif du système ARTIMOS est de fournir une aide à la gestion des perturbations. Cette aide consiste principalement à détecter des événements nuisibles, à classer ces événements pour déterminer les perturbations, à identifier les conséquences des perturbations et enfin, à orienter la prise de décision par la proposition d'actions de pilotage lors de la réaction à ces perturbations. Le système ARTIMOS a aussi pour objectif de permettre de capitaliser des connaissances lors du traitement des perturbations.

Le diagramme des cas d'utilisation de la [Figure 4.2](#) montre une vue macroscopique des fonctionnalités offertes par le système placé dans son environnement. Une description plus détaillée de ces fonctionnalités est donnée par le [Tableau 4.1](#).

De manière générale, nous remarquons que le système ARTIMOS s'intègre dans le paysage des systèmes d'information du système de production en offrant des fonctionnalités pour interfacier ces systèmes en entrée et en sortie. Cette interface est importante pour le système car elle permet de réaliser les fonctions de détection, de classification, d'identification et de réponse aux perturbations qui sont au cœur du système.

De surcroît, comme le système ARTIMOS génère et capitalise des connaissances, nous avons fait le choix de concevoir et de développer une base de connaissances centralisée destinée à la capitalisation de ces connaissances. Ce choix de conception sera argumenté dans la section suivante. Cette base s'intègre et complète le paysage des systèmes d'information.

Aussi le système permet d'interagir avec les décideurs humains, ce qui reflète son rôle de système d'aide à la décision. Cette interaction inclut non seulement la validation des propositions générées, mais aussi l'extension des capacités du système par des fonctionnalités qu'il ne peut fournir automatiquement (détection d'événements imprévisibles, identification de nouvelles conséquences, génération de nouvelles réponses par exemple) et la simulation de situations introduites par le décideur humain.

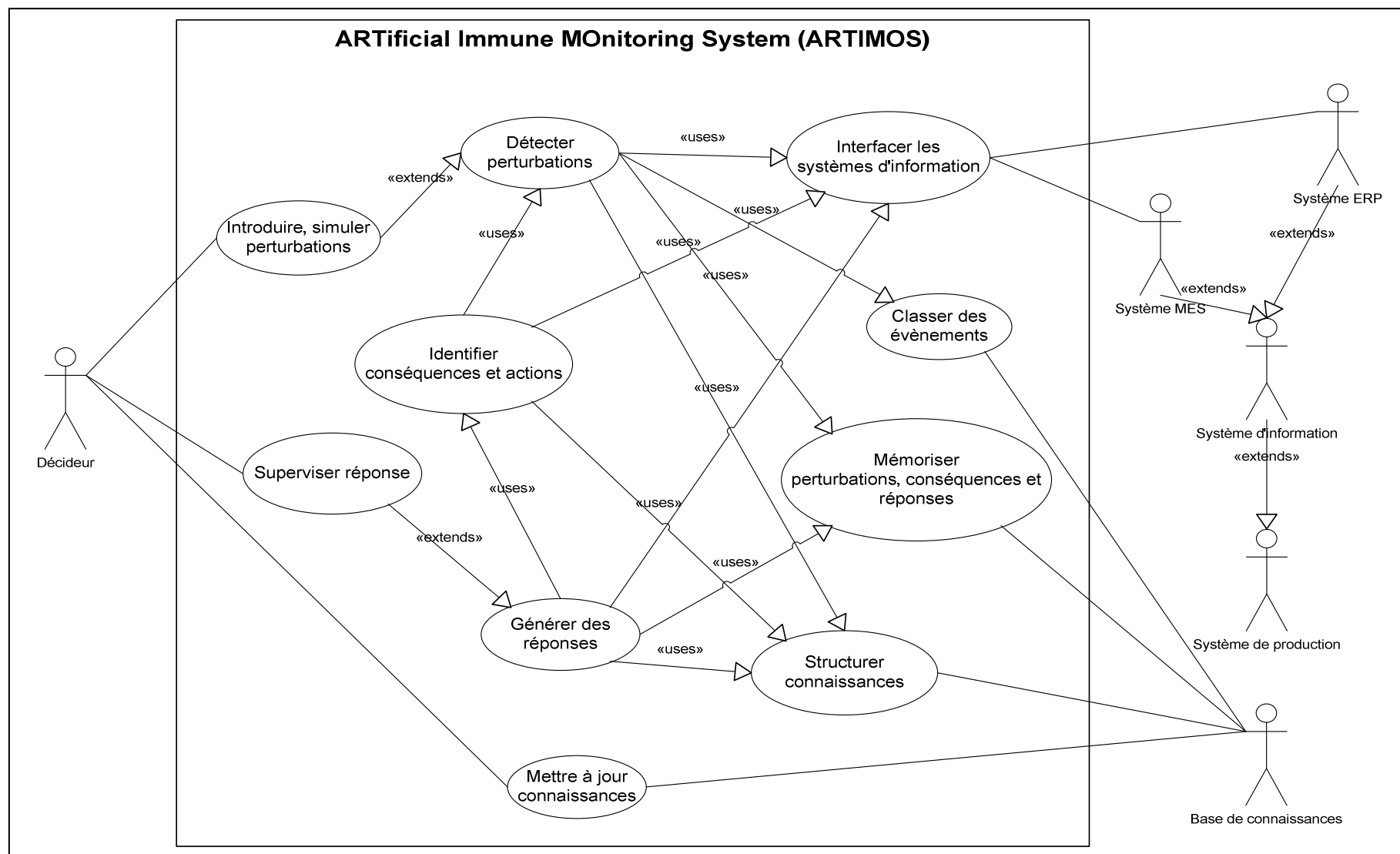


Figure 4.2: Diagramme des cas d'utilisation du système immunitaire artificiel pour le pilotage.

Tableau 4.1: Description des cas d'utilisation du système ARTIMOS.

Numéro	Cas d'utilisation	Description
1	Introduire, simuler perturbation	Le décideur peut introduire une perturbation dans le système afin de simuler son occurrence. Ceci lui permet d'anticiper les conséquences de la perturbation. Ce cas d'utilisation peut aussi servir à introduire au système des perturbations imprévisibles, qui ne peuvent être détectées automatiquement.
2	Mettre à jour les connaissances sur les perturbations	Le décideur peut consulter et mettre à jour la base de connaissances sur les perturbations (classes, attributs, relations, assertions, restrictions, règles, individus).
3	Structurer les connaissances	La base de connaissances structure les connaissances nécessaires à la gestion des perturbations (classification des perturbations, compétences des cellules).
4	Mémoriser les perturbations, les conséquences et les réponses	La base de connaissances stocke les occurrences de cas de perturbations (causes, conséquences, réponses aux perturbations).
5	Superviser réponse	Le décideur peut superviser les réponses aux perturbations proposées par le système : <ul style="list-style-type: none"> • Sélectionner une réponse parmi un ensemble de réponses proposées • Valider une réponse proposée • Modifier une réponse existante ou proposée • Introduire au système une nouvelle réponse ou de nouvelles connaissances • Supprimer des réponses parmi les réponses proposées
6	Détecter des perturbations	Le système peut détecter automatiquement l'occurrence de certaines perturbations à partir de la classification des événements perçus du système de production.
7	Classer des événements	Le système peut identifier l'appartenance d'événements à des classes de perturbations en faisant appel à une base de connaissances afin d'effectuer une classification automatique des événements perçus. Les actions de pilotage et les stratégies de réponse peuvent aussi être déterminées grâce à la classification des conséquences des perturbations.
8	Identifier les conséquences et les actions de pilotage	Le système identifie les conséquences dues à la détection et à l'introduction de perturbations dans le système. Il identifie aussi des actions de pilotage et des stratégies de réponse pour la prise en compte de la perturbation et de ses conséquences.
9	Générer des réponses	Le système génère des réponses aux perturbations par l'intermédiaire des cellules Th.
10	Interfacer les systèmes d'information	Le système détecte l'introduction de nouvelles activités de production dans le système d'information et lance les agents cellules correspondants. Le système met à jour les agents cellules avec l'état actualisé du système de production. les réponses aux perturbations sont ensuite communiquées en retour aux systèmes d'information.

4.3.2. Identification des agents et de leurs responsabilités

Le système ARTIMOS met en œuvre différents types de cellules, à la fois des cellules de l'organisme et des cellules immunitaires, pour piloter les ressources, les entités et les activités du système de production contre les perturbations.

Chaque type de cellules peut être développé en lui associant un type d'agents, ou plus exactement un groupe d'agents, pour être en concordance avec le modèle AGR. Mais le plus important est d'associer à chaque groupe d'agents les rôles qui lui sont spécifiques et qui découlent de l'étude de l'immunité biologique précédemment conduite. Ces rôles reflètent les responsabilités et les fonctionnalités que les agents de ce groupe vont devoir assumer.

En plus des types d'agents qui découlent directement de l'étude de l'immunité biologique, nous allons devoir introduire un certain nombre d'agents utilitaires supplémentaires destinés à faciliter le fonctionnement du système. C'est le cas par exemple de l'agent organisme dont le rôle consiste à initialiser le système en lançant les agents cellules à piloter et les agents cellules immunitaires.

Ainsi, le [Tableau 4.2](#) suivant identifie les différents groupes d'agents qui composent le système ARTIMOS et recense leurs responsabilités. Ce tableau est à mettre en correspondance avec le [Tableau 3.3](#) du chapitre précédent qui a présenté les rôles joués par chaque cellule.

Un certain nombre de remarques s'impose. Par exemple, les agents cellules de l'organisme sont mises à jour avec l'état du système de production. Cette actualisation permet de synchroniser les agents cellules avec l'activité physique et l'état réel du système de production, mais ne permet pas la détection d'anomalies ou de déviations, cette fonction étant confiée aux cellules APC.

Une fois que les cellules APC détectent et lancent un pathogène dans le système, elles continuent de mettre à jour l'état de ce pathogène jusqu'à ce que la perturbation soit éliminée par une réponse immunitaire. D'un autre côté, il incombe à chaque cellule de l'organisme de déterminer les conséquences de ce pathogène sur les spécifications de la cellule. C'est ainsi que les conséquences directes, indirectes et probables de la perturbation peut être déterminé.

Enfin, il incombe aussi à chaque cellule directement ou indirectement affectée par la perturbation de déterminer les conséquences résiduelles de l'élément perturbateur grâce à la participation dans l'évaluation de la réponse immunitaire formulée par les agents cellules Th.

Tableau 4.2: Description des agents du système ARTIMOS et de leurs responsabilités.

Agent	Responsabilités
Agent organisme	<ol style="list-style-type: none"> 1. scruter les systèmes d'information à l'écoute de l'introduction de nouvelles activités (ordres de fabrication, ordres de maintenance, ordres qualité, ordres d'achat, ordres de transport, ...) 2. lancer les agents cellules correspondants aux entités à piloter
Agent cellule de l'organisme	<ol style="list-style-type: none"> 7. acquérir l'état actualisé de l'entité du système de production que l'agent cellule représente 8. communiquer régulièrement les liens de spécification et l'état actualisé de la cellule vers les agents cellules APC 9. déterminer l'impact d'une perturbation ou des signaux de danger émis par les cellules environnantes sur la cellule en termes de conséquences directes, indirectes et/ou probables et créer les liens de danger correspondants 10. diffuser des signaux de danger pour signaler la mise en danger des spécifications de la cellule 11. évaluer la réponse reçue d'une cellule Th en termes de conséquences résiduelles sur les liens en danger de la cellule
Agents cellules APC	<ol style="list-style-type: none"> 1. scruter le système de production à travers la communication avec les agents cellules de l'organisme et détecter l'occurrence d'événements perturbateurs 2. identifier les types de perturbation à partir de la classification des événements perturbateurs détectés 3. préciser des attributs de la perturbation en créant les antigènes correspondants 4. lancer les agents pathogènes dans le système 5. mettre à jour les agents pathogènes avec les données actualisées (issues du système de production) concernant la perturbation 6. évaluer les propositions de réponses immunitaires présentées par les cellules Th
Agents pathogènes	<ol style="list-style-type: none"> 6. diffuser des antigènes et agresser les agents cellules 7. stimuler les agents cellules B 8. stimuler les agents cellules mémoire 9. stimuler les agents cellules Th
Agents cellules B	<ol style="list-style-type: none"> 6. détecter les antigènes libérés par les agents pathogènes 7. détecter les signaux de danger émis par les cellules agressées de l'organisme 8. proposer (aux cellules mémoire et aux cellules Th) des actions élémentaires de pilotage pour réagir aux antigènes et aux signaux de danger 9. optimiser action de pilotage 10. appliquer la réponse immunitaire sélectionnée
Agents cellules mémoire	<ol style="list-style-type: none"> 5. détecter les antigènes libérés par les agents pathogènes 6. détecter les signaux de danger émis par les cellules agressées de l'organisme 7. détecter les propositions des cellules B disponibles pour réagir aux antigènes et aux signaux de danger 8. stimuler des cellules Th : restituer des réponses mémorisées.

Agent	Responsabilités
Agents cellules Th	6. détecter les antigènes libérés par les agents pathogènes 7. détecter les signaux de danger émis par les cellules agressées de l'organisme 8. détecter les propositions des cellules B et des cellules mémoires disponibles pour réagir aux antigènes et aux signaux de danger 9. proposer des réponses cohérentes pour réagir aux antigènes et aux signaux de danger en combinant les propositions des cellules B et mémoire 10. sélectionner la meilleure réponse possible aux antigènes et aux signaux de danger 11. co stimuler cellules B : déclencher une réponse
Base de connaissances	1. capitaliser des connaissances : classes de perturbations, classes de dangers, actions de pilotage, réponses immunitaires... 2. classer des événements 3. identifier des compétences de cellules 4. participer dans la caractérisation des attributs des perturbations
Pages jaunes	Fournir un annuaire des agents et de leurs services (type, responsabilités) pour faciliter les communications entre agents cellules

4.3.3. Identification des accointances entre agents cellules

La description des agents et de leurs responsabilités permet de donner un premier aperçu sur leurs accointances. En effet, pour s'acquitter des responsabilités qui lui sont confiées, un agent doit communiquer avec d'autres agents dans son environnement, soit pour lui soustraire des informations, soit pour le mettre à jour avec des informations, soit pour lui demander d'effectuer des traitements.

Le diagramme des accointances de la [Figure 4.3](#) permet de cerner les interactions entre les agents du système ARTIMOS.

D'abord remarquons que ce diagramme est à mettre en correspondance avec la [Figure 3.1](#) du chapitre précédent. En effet, la [figure 3.1](#) illustre une abstraction des interactions dans un système immunitaire biologique, alors que la [Figure 4.3](#) présente un diagramme des interactions entre les agents cellules du système immunitaire artificiel pour le pilotage. Nous remarquons que l'analogie construite précédemment trouve ici une application immédiate. L'analogie a permis d'identifier et de capturer les interactions biologiques et à les reprendre exhaustivement dans une application artificielle.

Ensuite, nous remarquons que la [Figure 4.3](#) reprend le diagramme des cas d'utilisation de la [Figure 4.2](#) pour replacer le système ARTIMOS de manière plus précise dans son environnement.

Dans la [Figure 4.3](#), nous avons consacré un agent « *organisme* » pour interfacer tous les systèmes d'information. Nous aurions pu représenter un agent pour interfacer un système d'information à la fois. En fait, sur la [Figure 4.3](#), il s'agit simplement d'un choix de représentation. Ce choix reflète le besoin d'accéder à une information stockée en dehors du système ARTIMOS. Il faut préciser que ce choix ne constitue qu'une première approche pour gérer les communications entre le système ARTIMOS et les systèmes d'information de

l'entreprise. Néanmoins, ce problème de représentation adresse tout un domaine non trivial de la recherche qui s'intéresse aux problèmes d'interopérabilité entre systèmes et que nous ne détaillons pas davantage dans le cadre de notre travail.

Il est à noter que chaque agent du système ARTIMOS requiert un accès à une partie de l'information contenue dans les systèmes d'information. Par exemple, les cellules associées aux entités du système de production doivent accéder à l'état actualisé de l'entité représentée par l'intermédiaire du système MES. Aussi les cellules B et mémoire doivent avoir accès à des systèmes tels que le système ERP, SCM ou APS pour se renseigner sur l'existence d'alternatives. De fait, nous avons deux choix de conception possibles :

- Soit, on confère à chaque agent cellule du système ARTIMOS l'aptitude d'accéder directement, c'est-à-dire par ses propres moyens, à l'information dont il a besoin dans les systèmes d'information.
- Soit, on associe à chaque système d'information un agent pour l'interfacer et répondre aux requêtes des agents cellules.

Chacun de ces choix a été amplement discuté dans la littérature [Nikraz *et al.*, 2006]. La première solution bénéficie du grand avantage de la modularité. Chaque agent accède à l'information qui le concerne directement, indépendamment des autres agents et d'une manière qui lui est intelligible (syntaxe et sémantique des requêtes traitées au niveau de chaque agent). Par contre, l'inconvénient réside dans la multiplicité des interfaces de communication avec les systèmes d'information, puisqu'on doit concevoir une interface de communication pour chaque agent cellule. Cet inconvénient soulève le problème de la maintenabilité de ces interfaces.

L'avantage de la deuxième solution est qu'elle pallie l'inconvénient de la solution précédente. En effet, nous avons à concevoir une seule interface de communication par agent associé à un système d'information. Ceci réduit considérablement le nombre d'interfaces, réduit les redondances et les risques d'erreurs et facilite la maintenance et la mise à jour des interfaces.

Par contre, ce choix de conception soulève un problème non trivial du traitement syntaxique et sémantique des requêtes qu'un agent associé à un système d'information doit satisfaire. En effet, un tel agent doit être capable de recevoir et d'interpréter un grand nombre et une grande variété de requêtes provenant des agents cellules. Il n'est pas trivial pour un tel agent de pouvoir traduire systématiquement et automatiquement ces requêtes dans le langage du système d'information qu'il représente et de répondre à ces requêtes précisément et exhaustivement.

Dans notre maquette à échelle réduite, nous avons trouvé un compromis. Ce compromis consiste à concevoir un agent « organisme » pour initialiser le système avec les agents cellules associés aux entités à piloter et avec les agents cellules immunitaires. Par contre, chaque agent cellule dispose d'un accès direct aux systèmes d'information pour récupérer les informations dont il a besoin.

Ce problème de choix de conception et de représentation se retrouve presque à l'identique en ce qui concerne la conception de la base de connaissances. Puisque chaque agent cellule du système ARTIMOS doit disposer de connaissances pour fonctionner correctement, on peut choisir soit d'associer une base de connaissances à chaque agent cellule, soit centraliser toutes

les connaissances dans une base de connaissances unique, et puis gérer les accès des agents aux connaissances qui les intéressent. Nous avons opté pour cette dernière solution.

En effet, la centralisation des connaissances en une base unique permet de mieux maîtriser l'expansion de la base et de mieux gérer sa maintenance et sa mise à jour. En plus de son utilité aux différents agents du système, cette base représente en soi un outil d'aide à la décision pour les décideurs humains. Ces derniers ont à la mettre à jour régulièrement par de nouvelles connaissances sur les perturbations, leurs causes, leurs conséquences et les actions pour les traiter. Centraliser la base lui confère des modes d'accès plus simples. Distribuer la base de connaissances introduit des redondances parfois non souhaitables et complique la restitution de l'information complète. Toutefois, il serait judicieux d'approfondir l'étude sur les mérites et les inconvénients de la décentralisation de la base de connaissances. À l'échelle de notre maquette de travail, une base centralisée nous suffit.

Finalement, la [Figure 4.3](#) illustre le rôle du décideur dans le système. Ce dernier peut agir directement sur la base de connaissances pour la maintenir, la mettre à jour et l'enrichir de son expertise. Il peut aussi intervenir directement sur les différents agents cellules. Par exemple, le décideur peut introduire directement des perturbations dans le système sous forme de pathogènes, soit parce que le système est incapable de les détecter automatiquement, soit pour des besoins de simulation en réponse à des questions du type « *qu'est ce qui se passerait si... ?* ». Il peut intervenir sur les propositions du système, soit sur les cellules B et mémoire, soit sur les cellules Th, pour valider, invalider, ajouter ou supprimer des propositions.

4.3.4. Spécification des interactions entre agents cellules

Dans cette section, les [tableaux 4.3 à 4.8](#) suivants détaillent les interactions entre agents cellules dans le système. Ces interactions découlent des responsabilités des agents précédemment décrites, et sont à mettre en correspondance avec les [tableaux 3.1 et 3.2](#) récapitulant les analogies de structure et de mécanismes du chapitre précédent.

Tableau 4.3: Table des interactions d'un agent cellule de l'organisme

Interaction	Avec (accointance)	Principe immunitaire	Entrée	Rôle	Sortie
Superviser activités (responsabilité 1)	Agent organisme	Cycle de vie d'une cellule biologique. Une cellule de l'organisme remplit un rôle pendant sa durée de vie puis meurt.	Création de la cellule par l'agent organisme et renseignement de ses spécifications de délais, qualité, coûts.	Assurer le suivi du cycle de vie d'une cellule (création, lancement, fin). Actualiser l'état de la cellule avec les données mises à jour du système de production.	Mort et évacuation de la cellule lorsqu'elle atteint la fin de son cycle de vie (mort naturelle).
Signaler mise en danger (responsabilités 3 et 4)	Agent pathogène + autres agents cellules de l'organisme	Théorie du danger. Les cellules de l'organisme, qui sont agressées par un pathogène, ou mises en danger par d'autres cellules, émettent des signaux de danger dans un certain périmètre.	Caractéristiques d'une perturbation (antigène d'un pathogène) et/ou signaux de danger de cellules du voisinage	Vérifier si les spécifications de la cellule (qualité, délais, coûts) sont affectées par les caractéristiques de la perturbation (antigènes) et/ou mises en danger par les signaux de danger	Spécification agressée (signal de danger) et/ou mise en danger
Evaluer réponse immunitaire (responsabilité 5)	Agents cellules Th	Réponse immunitaire. Les cellules immunitaires agissent sur les cellules infectées de l'organisme.	Réponse immunitaire	Evaluer la réponse reçue d'une cellule Th en termes de conséquences résiduelles sur les liens en danger de la cellule	Niveau des conséquences résiduelles (retard résiduel, coût résiduel ou surcoût, éventuellement de nouvelles conséquences...)

Tableau 4.4: Table des interactions d'un agent pathogène

Interaction	Avec (accointance)	Principe immunitaire	Entrée	Rôle	Sortie
Agresser agents cellules de l'organisme (responsabilité 1)	Agents cellules de l'organisme	Propagation antigénique. En s'introduisant dans l'organisme, un pathogène trouve les conditions favorables pour se multiplier, libérer ses antigènes et agresser les cellules de l'organisme	Création d'un pathogène et renseignement de ses antigènes par les cellules APC	Diffuser antigène aux différentes cellules de l'organisme et cellules immunitaires	Antigènes diffusés

Tableau 4.5: Table des interactions d'un agent cellule APC

Interaction	Avec (accointance)	Principe immunitaire	Entrée	Rôle	Sortie
Détecter perturbation (responsabilité 1)	Agents cellules de l'organisme et agent organisme	Détection de pathogènes. les cellules APC scrutent l'organisme à la recherche des pathogènes et de leurs antigènes.	Spécifications et état actualisé des agents cellules de l'organisme. Eventuellement, acquérir des mesures complémentaires du système de production par l'intermédiaire de l'agent organisme	Scruter le système de production à travers la communication avec les agents cellules de l'organisme et détecter l'occurrence d'anomalies et/ou de déviations.	Anomalies ou déviations détectées
Identifier perturbation (responsabilité 2)	Base de connaissances	Capture de pathogènes. Les récepteurs (PRR) à la surface des cellules APC reconnaissent de façon générique les éléments qui n'appartiennent pas à l'organisme (PAMP).	Anomalies ou déviations détectées	Classer les anomalies et/ou déviations détectées pour confirmer l'occurrence d'une perturbation et identifier sa classe.	Perturbation confirmée et classe de perturbation identifiée
Introduire perturbation dans le système en tant que pathogène (responsabilités 3 et 4)	Agent organisme, et traitement interne à l'agent cellule APC	Identification des antigènes. Les cellules APC capturent le pathogène, le décomposent en antigènes et présentent ces antigènes à leur surface (caractériser les antigènes des agents pathogènes).	Classe de perturbation + données sur son historique obtenus soit à partir de la base de connaissances, soit à partir de systèmes externes (GMAO, GQAO, ...) par l'intermédiaire de l'agent organisme	Déterminer les caractéristiques de la perturbation détectée (estimations de durée, de coût, ...)	Création d'un agent pathogène portant les antigènes de la classe de perturbation identifiée
Actualiser perturbation (responsabilité 5)	Agent pathogène, agent organisme, agents cellules	Présentation antigénique. Les cellules APC conditionnent les antigènes et les présentent à leur surface aux cellules de l'immunité adaptative.	Etat actualisé du système de production, acquis soit à travers les agents cellules, soit directement à travers l'agent organisme	Actualiser les antigènes de l'agent pathogène avec les données du système de production	Communiquer à l'agent pathogène des antigènes mis à jour

Interaction	Avec (accointance)	Principe immunitaire	Entrée	Rôle	Sortie
Activation de réponses immunitaires (responsabilité 6)	Cellules Th	Co stimulation APC – Th. Les cellules APC influencent la réponse immunitaire vers la tolérance ou le rejet des pathogènes en stimulant les cellules Th (activation/inhibition)	Propositions de réponses provenant de cellules Th	Evaluer l'aptitude des réponses proposées par les cellules Th à éliminer ou à réduire la perturbation	Activer les cellules Th qui fournissent une réponse capable de ramener les conséquences résiduelles à des seuils tolérables

Tableau 4.6: Table des interactions d'une cellule mémoire

Interaction	Avec (accointance)	Principe immunitaire	Entrée	Rôle	Sortie
Détecter contexte perturbé (responsabilités 1, 2 et 3)	Agent pathogène, agents cellules de l'organisme, agents cellules B et base de connaissances	Principe d'activation des cellules mémoire. Passé un certain seuil d'affinité fonction de l'antigène et de la co stimulation, les cellules mémoire sont activées.	Antigènes + signaux de danger + propositions de cellules B	Vérifier s'il existe, dans la base de connaissances, une cellule mémoire compétente pour réagir aux antigènes et signaux de dangers en utilisant un sous ensemble des cellules B disponibles	Si la cellule mémoire est compétente alors elle est activée
Restituer réaction (responsabilité 4)	Cellules Th	Mémoire immunitaire.	Cellule mémoire activée	Proposer les réactions mémorisées	Restitution d'une réaction mémorisée

Tableau 4.7: Table des interactions d'un agent cellule B

Interaction	Avec (accointance)	Principe immunitaire	Entrée	Rôle	Sortie
Détecter perturbation (responsabilité 1)	Agent pathogène et base de connaissances	Détection de pathogènes. Les cellules de l'immunité adaptative disposent à leur surface de récepteurs leur permettant de reconnaître les antigènes et de se lier spécifiquement aux pathogènes.	Antigènes d'un pathogène (caractéristiques d'une perturbation)	Vérifier si la cellule B est compétente pour réagir à ce type de perturbation	Si la cellule B est compétente alors elle est activée
Détecter signaux de danger (responsabilité 2)	Agents cellules de l'organisme et base de connaissances	Théorie du danger. Les cellules B sont stimulées par les signaux de danger émis par des cellules agressées	Signaux de danger émis par les cellules agressées	Vérifier si la cellule B est compétente pour réagir à ce type de signaux de danger	
Proposer action de pilotage (responsabilité 3)	Agent organisme, agents cellules mémoire et cellules Th	Présentation antigénique. Les cellules B capturent le pathogène, le décomposent et le présentent à leur surface pour le communiquer aux cellules mémoire et Th	Cellule activée : confirmation de compétence pour réagir à l'antigène et/ou aux signaux de danger (perturbation et cellules agressées)	Vérifier dans le système d'information l'existence d'alternatives de pilotage correspondant à chaque action de pilotage. Présenter ces alternatives aux cellules mémoire et Th.	Alternatives de pilotage
Optimiser action de pilotage (responsabilité 4)	Agents cellules B	Sélection clonage. Les cellules B activées se propagent et se différencient pour améliorer leur pouvoir de neutralisation du pathogène	Paramètres des actions de pilotage telles que fournies par les cellules mémoire et/ou les cellules Th	En cas de problème combinatoire (re séquencement, réaffectation, ré ordo), explorer l'espace de recherche pour trouver une bonne solution	Solution de bonne qualité
Appliquer réponse (responsabilité 5)	Pathogène, agents cellules affectées, agent organisme	Elimination du pathogène et du danger. Les anticorps se lient au pathogène et enclenchent le processus de son élimination.	Résultat de la réponse immunitaire déterminée par une cellule Th, solution de bonne qualité trouvée	Appliquer la réponse en agissant sur les cellules du système immunitaire artificiel (état du pathogène et des cellules affectées) et sur les systèmes d'information	Matérialisation du résultat de la réponse (suppression d'ordres, édition de nouveaux ordres, modification de caractéristiques...)

Tableau 4.8: Table des interactions d'une cellule Th

Interaction	Avec (accointance)	Principe immunitaire	Entrée	Rôle	Sortie
Détecter contexte perturbé (responsabilités 1, 2 et 3)	Agent pathogène, agents cellules de l'organisme, agents cellules B et mémoire	Principe d'activation des cellules Th. Passé un certain seuil d'affinité fonction de l'antigène, des signaux de danger et de la stimulation des cellules B et mémoire (présentation antigénique), les cellules Th sont activées.	Antigènes + signaux de danger + Propositions des cellules B et mémoire	Activer cellule Th	Cellule Th activée
Proposer réponses (responsabilité 4)	Traitement interne à chaque agent cellule Th	Sélection clonage et sélection négative.	Propositions des cellules B et mémoire	Combiner les propositions des cellules B et mémoire de façon à trouver un ensemble de réponses globales cohérentes.	Un ensemble de réponses immunitaires éligibles à être appliquées
Sélectionner réponse (responsabilité 5)	Cellules Th	Réseau immunitaire.	Cellules Th évaluées et activées par les cellules APC et les cellules de l'organisme	Les cellules Th interagissent entre elles selon le principe du réseau immunitaire pour faire émerger la réponse la plus adaptée au contexte perturbé	Réponse immunitaire la plus adaptée au contexte perturbé + mise à jour des liens du réseau immunitaire
Déclencher une réponse (responsabilité 6)	Cellules B	Co stimulation Th – B. Les cellules Th confirment l'activation des cellules B déjà stimulées par l'antigène et les signaux de danger.	Réponse immunitaire trouvée (Th sélectionnée comme réponse à appliquer)	Activer cellules B (actions de pilotage) impliquées dans la réponse déterminée et mettre à jour les réseaux immunitaires des cellules B et des cellules mémoire	Paramètres des actions de pilotage tels que fixés par la réponse immunitaire issue de la combinaison des propositions des cellules B et mémoire

4.4. Développement de modèles de comportement des agents

Dans cette section, nous donnons un aperçu de la spécification des modèles de comportement de chaque type d'agents du système. Le modèle de comportement d'un agent décrit l'ensemble des états dans lesquels l'agent peut se trouver, les responsabilités dont il doit s'acquitter dans chaque état, les événements auxquels il réagit, et les interactions auxquelles il prend part. Les modèles comportementaux des agents permettent ainsi de rendre compte des aspects dynamiques des agents dans leur environnement.

Dans les sections suivantes, nous utilisons les diagrammes états transitions du langage UML pour donner un aperçu des modèles de comportement des principaux types d'agents cellules du système, c'est-à-dire respectivement les agents pathogènes, les agents cellules de l'organisme, les agents cellules APC, les agents cellules B et mémoire, et les agents cellules Th.

4.4.1. Modèle de comportement des agents pathogènes

Le comportement d'un agent pathogène est régi par le modèle comportemental de la [Figure 4.4](#). Ce modèle reflète la dynamique d'un agent pathogène dans le système.

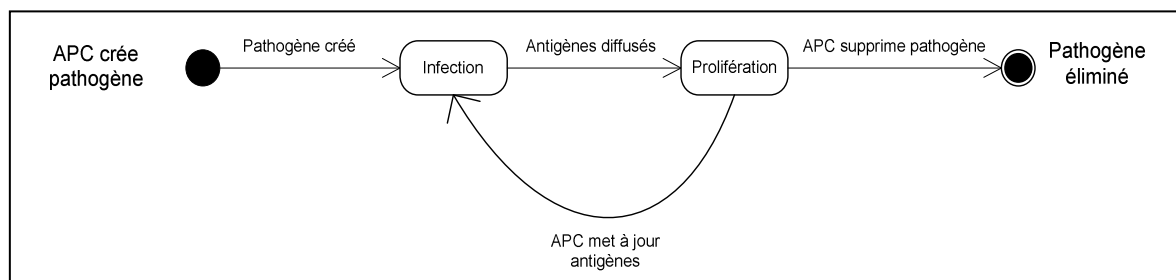


Figure 4.4: Modèle comportemental d'un agent pathogène.

Un agent pathogène est créé par un agent cellule APC suite à la détection d'une perturbation. L'agent cellule APC renseigne les antigènes du pathogène, c'est-à-dire que l'agent cellule APC détermine les attributs de la perturbation. Pour ce faire, l'agent cellule APC peut :

- Soit consulter l'historique des perturbations identiques ou similaires et proposer une estimation des attributs en extrapolant les données de l'historique. Cet historique peut être obtenu en consultant la base de connaissances que nous spécifions dans la section suivante.
- Soit solliciter des systèmes spécifiques, tels que la GMAO, la GQAO, etc., pour avoir une estimation plus précise.
- Soit solliciter l'avis de décideurs humains.

Par exemple, un agent pathogène de type « *panne machine* » est créé suite à la détection des premiers symptômes d'une panne (déviations de cadence, problèmes qualité, ...). Dans ce cas, l'agent cellule APC doit renseigner la durée de la panne (antigène temps) soit en consultant l'historique des pannes identiques ou similaires, soit en consultant le système GMAO, soit en

sollicitant l'intervention d'un expert humain en maintenance. Les symptômes ayant conduit à la détection de la panne représentent l'antigène qualité.

Dès sa création, l'agent pathogène passe à l'état « *Infection* ». Dans cet état, l'agent pathogène diffuse ses antigènes pour agresser les agents cellules de l'organisme (entités du système de production, telles que les opérations de production), et stimuler les agents cellules B et mémoire (actions de pilotage).

Par exemple, l'agent pathogène de type « *panne machine* » diffuse ses antigènes temps (durée de panne) et qualité (symptômes de la panne : déviation de mesures, ...) parmi les agents cellules de l'organisme, cellules B et mémoire.

Dès la diffusion des antigènes, la transition « *antigènes diffusés* » est validée et l'agent passe à l'état « *Prolifération* ». Cet état reflète la propagation de la perturbation dans le système de production. Il traduit le fait que l'agent pathogène s'est propagé dans le système et a agressé des cellules. Deux cas possibles permettent de sortir de cet état :

- La cellule APC qui a créé l'agent pathogène met à jour ses antigènes, c'est-à-dire qu'elle actualise les attributs de la perturbation soit par le suivi de l'état du système de production et la révision des estimations déjà faites, soit en application d'une réponse immunitaire qui ne suffit pas à éliminer totalement la perturbation. L'agent pathogène retourne à l'état « *Infection* » pour rediffuser ses antigènes. Dans l'exemple de la panne machine, la cellule APC qui a détecté cette perturbation peut réévaluer la durée de la panne en fonction du résultat de l'intervention du service de maintenance.
- La cellule APC qui a créé l'agent pathogène le supprime en application d'une réponse immunitaire qui élimine totalement la perturbation. Dans ce cas, l'agent pathogène est retiré du système. Dans l'exemple de la panne machine, si le service maintenance parvient à réparer la panne conformément aux estimations de durée de la panne, alors la cellule APC supprime l'agent pathogène.

4.4.2. Modèle de comportement des agents cellules de l'organisme

Le comportement d'un agent cellule de l'organisme (associé à une entité du système de production) est régi par le modèle comportemental de la [Figure 4.5](#). Ce modèle reflète la dynamique d'un agent cellule de l'organisme dans le système.

L'agent organisme consulte régulièrement les systèmes d'information tels que le système ERP ou SCM, pour créer les agents cellules de l'organisme. Ces agents correspondent aux nouvelles activités introduites dans le système de production et aux entités qui leurs sont associées.

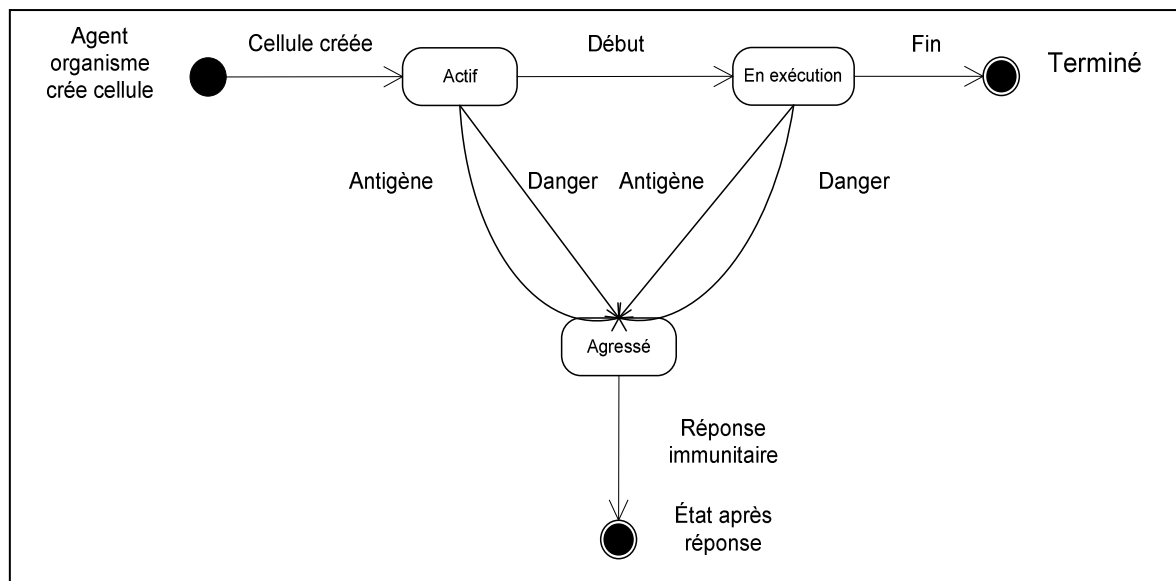


Figure 4.5: Modèle comportemental d'un agent cellule de l'organisme.

Dès sa création, un agent cellule de l'organisme se retrouve dans l'état « *actif* ». Dans cet état, l'agent cellule est en attente d'entrer en phase d'exécution dès que sa date de début est atteinte. L'agent cellule est en écoute de messages d'agression (antigènes en provenance d'éventuels agents pathogènes) et de signaux de danger (liens de spécification en danger en provenance d'éventuels agents cellules affectées). A la réception d'antigènes et/ou de signaux de danger, il incombe à une cellule de vérifier si ses liens de spécification sont en danger. Dans l'affirmative, la cellule diffuse des signaux de danger et se met en état « *agressé* ».

Dans l'état « *en exécution* », l'agent cellule supervise l'entité du système de production à laquelle il est associé jusqu'à atteindre la date de fin de vie de la cellule, date à laquelle l'agent cellule est normalement évacué du système. Dans l'état « *en exécution* », l'agent cellule communique avec les systèmes d'information pour avoir l'état actualisé de l'entité à laquelle il est associé. D'un autre côté, l'agent cellule communique avec les cellules APC pour leur fournir les spécifications de la cellule ainsi que son état actualisé.

De même que dans l'état actif, la cellule est en écoute de messages d'agression et de signaux de danger. A la réception d'antigènes et/ou de signaux de danger, il incombe à une cellule de vérifier si ses liens de spécification sont en danger. Dans l'affirmative, la cellule diffuse des signaux de danger et se met en état « *agressé* ».

Lorsque la date de fin de vie de l'agent cellule est atteinte, ce dernier passe à l'état « *terminé* ». L'agent cellule est normalement évacué du système.

Lorsque la cellule est agressée par un antigène ou mise en danger par d'autres cellules affectées, l'agent cellule passe à l'état « *agressé* ». La cellule reste sensible aux antigènes et aux signaux de danger et met à jour son état en conséquence. Dans cet état, la cellule reçoit et évalue des propositions de réponses immunitaires de la part des cellules Th. L'évaluation est en termes de conséquences résiduelles. Enfin, seules les actions des cellules B, résultant de la sélection d'une réponse immunitaire à appliquer peuvent faire sortir la cellule de l'état agressé.

Cette sortie se fait vers l'un des états suivants :

- Vers l'état « *actif* » si les actions des cellules B modifient la date de début de la cellule.
- Vers l'état « *en exécution* » si les actions des cellules B décident d'ignorer la perturbation, d'entamer ou de continuer l'exécution de la cellule.
- Vers l'état « *terminé* » si les actions des cellules B décident de supprimer la cellule.

4.4.3. Modèle de comportement des agents cellules APC

Les agents cellules APC sont régis par le modèle comportemental de la [Figure 4.6](#). Ce modèle reflète la dynamique d'un agent cellule APC dans le système.

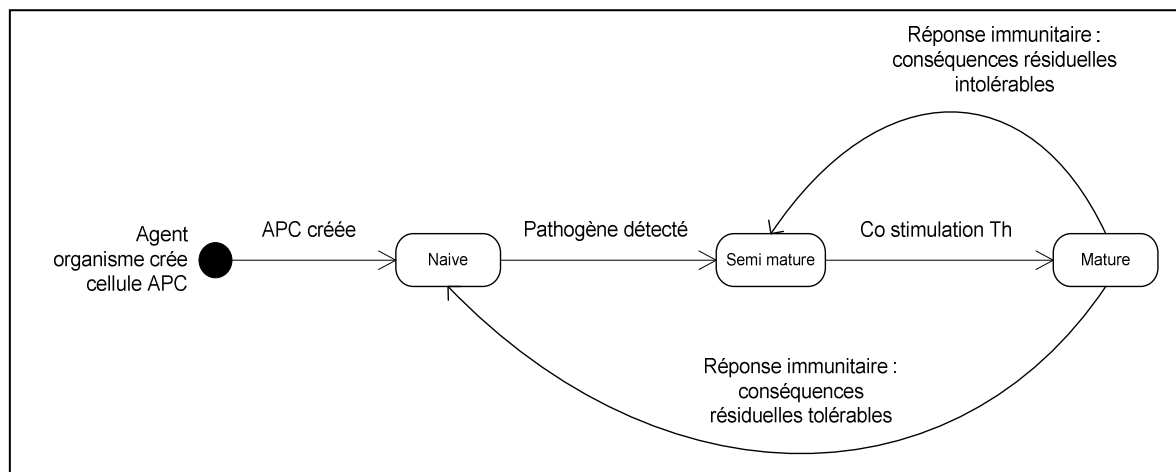


Figure 4.6: Modèle comportemental d'un agent cellule APC.

L'agent organisme initialise le système ARTIMOS en lançant les cellules APC.

Dès son lancement, une cellule APC se trouve dans l'état « *naïf* ». Dans cet état, les cellules APC sont en interaction avec les agents cellules de l'organisme pour détecter des perturbations. Les agents cellules de l'organisme envoient périodiquement leurs spécifications ainsi que leur état actualisé – acquis depuis les systèmes d'information – vers les agents cellules APC. Ces derniers se chargent de détecter les anomalies et les déviations intolérables.

Lorsqu'une perturbation est détectée, l'agent cellule APC lance l'agent pathogène correspondant et passe à l'état « *semi mature* ». Dans cet état, l'agent cellule APC qui a détecté la perturbation assume trois responsabilités :

- Il continue à interagir avec les cellules de l'organisme, à la fois celles affectées et non affectées, pour détecter d'autres éventuelles perturbations.
- Il met à jour les antigènes de l'agent pathogène lancé, c'est-à-dire qu'il actualise les attributs de la perturbation par le suivi de l'état du système de production et la révision des estimations déjà faites.
- Il reçoit des propositions de réponse de la part des agents cellules Th. Il évalue ces propositions en termes de conséquences résiduelles sur la perturbation. Plus

particulièrement, les cellules APC déterminent si les réponses proposées par les cellules Th sont capables d'éliminer totalement ou bien partiellement la perturbation. Pour ce faire, l'agent cellule APC peut solliciter des systèmes informatisés externes (GMAO, GQAO, ...) ou bien l'intervention d'experts humains.

Lorsqu'une réponse immunitaire est sélectionnée, l'agent cellule Th correspondant envoie à l'agent cellule APC qui a détecté la perturbation un signal de co stimulation. Ce signal informe l'agent cellule APC qu'une réponse a été sélectionnée et est en train d'être appliquée. L'agent cellule APC passe alors à l'état « *mature* ». Dans cet état, l'agent cellule APC assume deux responsabilités :

- Il continue à interagir avec les agents cellules de l'organisme pour détecter d'autres éventuelles perturbations.
- Il assure un suivi de la réalisation de la réaction à la perturbation. Si la réponse immunitaire élimine effectivement la perturbation, alors l'agent cellule APC passe à l'état « *naïf* » et arrête le processus de réponse immunitaire. Si la réponse immunitaire n'élimine que partiellement la perturbation, alors l'agent cellule APC retourne à l'état « *semi mature* ». Dans cet état, il met à jour les antigènes de l'agent pathogène ce qui équivaut à relancer un pathogène dans le système. L'agent cellule APC relance ainsi le processus de réponse immunitaire.

4.4.4. Modèle de comportement des agents cellules B

Les agents cellules B sont régis par le modèle comportemental de la [Figure 4.7](#). Ce modèle reflète la dynamique d'un agent cellule B dans le système.

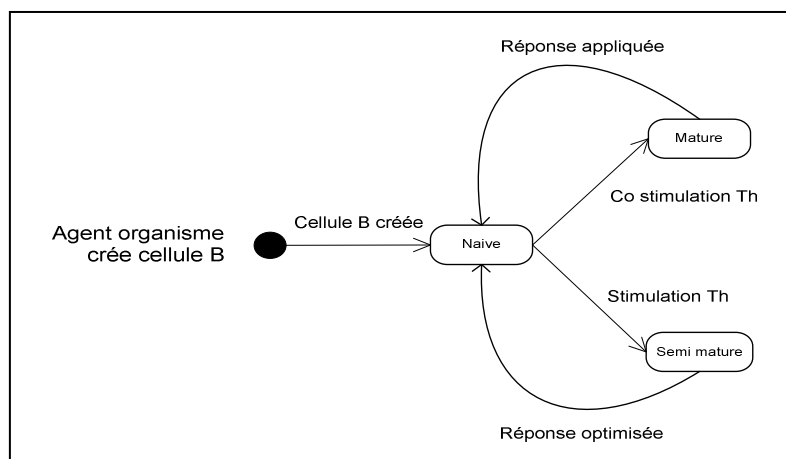


Figure 4.7 : Modèle comportemental d'un agent cellule B.

L'agent organisme initialise le système ARTIMOS en lançant les agents cellules B.

Dès son lancement, un agent cellule B se trouve dans l'état « *naïf* ». Dans cet état, un agent cellule B est sensible aux antigènes et aux signaux de danger. A la réception de tels signaux, chaque agent cellule B vérifie sa compétence pour intervenir sur ces signaux. Si l'agent cellule B est compétent pour intervenir, alors il interagit avec les systèmes d'information pour

vérifier l'existence d'alternatives de pilotage. S'il existe des alternatives de pilotage alors l'agent est activé. Il présente alors des propositions de pilotage aux agents cellules Th.

Les cellules Th combinent les propositions des cellules B et mémoire afin de construire des réponses cohérentes. Ensuite, les cellules Th stimulent les agents cellules B impliquées dans les réponses trouvées pour optimiser ces réponses et en fixer définitivement les paramètres et les variables (dates d'ordonnancement, d'approvisionnement...). A la réception de ce signal de stimulation, les cellules B passent à l'état « *semi mature* ». Dans cet état, les cellules B restent à l'écoute des signaux de danger et des antigènes. A la réception de tels signaux, cela veut très probablement dire que les propositions précédemment faites sont obsolètes. La cellule retourne alors à l'état « *naïf* » pour pouvoir refaire des propositions aux cellules Th.

Une fois que les agents cellules Th sélectionnent une réponse, ils co stimulent les agents cellules B. Ces derniers passent à l'état « *mature* » dans lequel ils vont appliquer la réponse. Les agents cellules B interagissent avec les systèmes d'information, l'agent pathogène et les agents cellules pour les mettre à jour et appliquer la réponse.

4.4.5. Modèle de comportement des agents cellules Th

Un agent cellule Th est régi par le modèle comportemental de la [Figure 4.8](#). Ce modèle reflète la dynamique de l'agent dans le système.

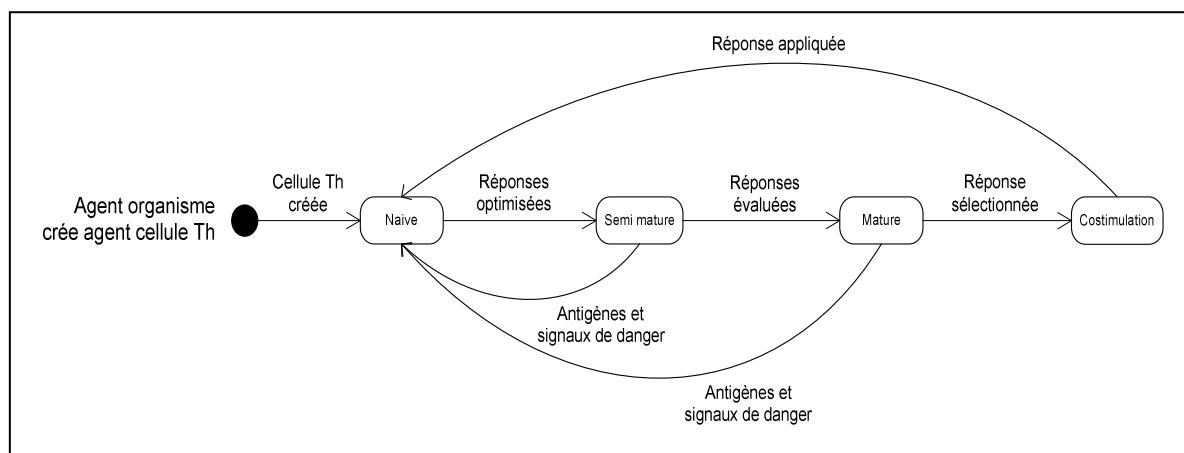


Figure 4.8: Modèle comportemental d'un agent cellule Th.

Pendant l'initialisation du système ARTIMOS, l'agent organisme lance un agent cellule Th.

Dès son lancement, un agent cellule Th est à l'état « *naïf* » dans lequel il est sensible aux antigènes, aux signaux de danger et aux propositions des cellules B et mémoire. Dans cet état, l'agent cellule Th combine les propositions des cellules B et mémoire pour construire des réponses cohérentes. L'agent cellule Th interagit avec les agents cellules B pour qu'ils affinent leurs propositions, optimisent et évaluent les réponses construites en termes de critères de performance.

Une fois, les réponses optimisées et évaluées, l'agent cellule Th passe à l'état « *semi mature* » dans lequel il interagit avec les agents cellules de l'organisme et les agents cellules APC pour avoir leur évaluation des réponses proposées en termes de conséquences résiduelles. Suite à ces interactions, l'agent cellule Th dispose de réponses évaluées à la fois en termes de critères

de performance et de conséquences résiduelles. Il peut alors passer à l'état « *mature* ». A la réception de signaux de dangers et/ou d'antigènes, l'agent cellule Th quitte l'état « *semi mature* » et retourne à l'état « *naïf* ». Ce retour permet de tenir compte des nouveaux antigènes et/ou signaux de danger reçus, de mettre à jour les propositions des cellules B et mémoire et de réinitialiser le processus de construction de réponses immunitaires.

A l'état « *mature* », l'agent cellule Th sélectionne parmi les réponses disponibles, celle qui représente le meilleur compromis entre performance et conséquences résiduelles. Pour les mêmes raisons que précédemment, à la réception de signaux de dangers et/ou d'antigènes, l'agent cellule Th quitte l'état « *mature* » et retourne à l'état « *naïf* ».

Lorsqu'une réponse immunitaire est sélectionnée, l'agent cellule Th passe à l'état « *costimulation* ». Dans cet état, l'agent cellule Th assume trois responsabilités :

- Il co stimule les cellules APC pour leur dire qu'une réponse a été sélectionnée et qu'elle est en train d'être appliquée. Ceci permet aux cellules APC de se mettre à l'état d'assurer un suivi de la réponse afin de déterminer si cette dernière élimine totalement ou partiellement la perturbation.
- Il pilote les cellules B pour mettre en œuvre la réponse sélectionnée.
- Il interagit avec la base de connaissances pour mémoriser la perturbation (antigènes), ses conséquences (signaux de danger) et la réponse ayant permis d'y réagir (propositions des cellules B et mémoire) en tant que cellule mémoire.

Une fois la réponse appliquée, l'agent cellule Th retourne à l'état « *naïf* ».

4.5. Ontologies : outil de gestion de communications entre agents et de capitalisation de connaissances

Le système ARTIMOS met en œuvre plusieurs agents qui interagissent selon des principes immunitaires afin de réagir aux perturbations. Or, les principes immunitaires qui régissent les interactions des agents nécessitent de pouvoir mémoriser et restituer des connaissances et des informations sur les perturbations.

D'autre part, ces interactions nécessitent que chaque agent dispose de connaissances sur ses compétences et sur la nature des signaux qu'il manipule. Chaque agent doit aussi pouvoir partager et communiquer des informations avec d'autres agents. Par exemple, les agents cellules doivent pouvoir interpréter les antigènes et les signaux de danger qu'ils perçoivent afin de déterminer si les entités qu'ils représentent sont affectées ou non par une perturbation ou une de ses conséquences. Les agents cellules B et mémoire doivent pouvoir interpréter les antigènes et les signaux de danger qu'ils perçoivent afin de déterminer s'ils sont compétents pour intervenir.

En conséquence, il est nécessaire de structurer et d'organiser les connaissances et les informations manipulées par les agents du système.

Pour ce faire, nous proposons de développer un modèle de connaissances basé sur une ontologie et destiné à mémoriser les perturbations, leurs conséquences ainsi que les actions ayant permis d'y réagir. Ce modèle permet d'atteindre trois objectifs. D'abord il sert à formaliser la communication entre les agents du système. Ensuite, il représente une base de connaissances qui permet à chaque agent d'interpréter les stimuli de son environnement et de s'acquitter de ses responsabilités. Il permet enfin d'acquérir des connaissances lors du traitement de perturbations afin de les réutiliser lorsque d'autres perturbations similaires ou identiques ont lieu.

Les ontologies sont un outil pour la modélisation et la description de connaissances sur un domaine d'intérêt dit domaine de discours [Horridge *et al.*, 2004]. Une ontologie décrit non seulement les concepts du domaine de discours, mais aussi les relations qui existent entre ces concepts. Ceci permet de définir un vocabulaire pour ce domaine ainsi qu'une spécification de la sémantique des termes utilisés dans ce vocabulaire.

Les ontologies varient de simples classifications ou taxonomies, à des modèles de bases de connaissances, à des théories axiomatiques complètes. Récemment, les ontologies ont été adoptées par plusieurs communautés scientifiques comme un moyen de partager, réutiliser et traiter les connaissances d'un domaine. Les ontologies sont actuellement d'une grande importance pour plusieurs applications telles que les portails scientifiques, les systèmes de gestion et d'intégration de l'information, le commerce électronique et le web sémantique [Uschold and Gruninger, 1996].

Différents langages de développement d'ontologies existent, parmi lesquels le langage OWL du consortium W3C³ représente le standard le plus récent. Ce langage permet de définir et de décrire des concepts en utilisant l'héritage et des opérateurs logiques tels que AND, OR et la négation. Des concepts complexes peuvent ainsi être construits en se basant sur des définitions de concepts plus simples. De plus, ce langage est basé sur un modèle logique qui permet de faire appel à un moteur de raisonnement (« *reasoner* »). Un tel système peut vérifier la consistance des déclarations et des définitions de l'ontologie et peut reconnaître quels concepts satisfont quelles définitions. En conséquence, un tel système peut aider à maintenir une hiérarchie de concepts correcte.

Les ontologies OWL peuvent être catégorisées en se basant sur l'expressivité du sous langage dans lequel elles seront développées. Parmi ces sous langages, le langage OWL DL est basé sur une partie décidable⁴ de la logique de premier ordre – qui est la logique de description, « *Description Logics* » – et peut être utilisé pour automatiser les raisonnements (« *automated reasoning* »). Ainsi, il devient possible d'automatiser la classification de la hiérarchie de concepts et de déterminer les inconsistances d'une ontologie développée dans ce langage.

Une ontologie OWL est composée d'individus, de propriétés et de classes. Les individus sont des instances de classes et représentent les objets du domaine d'intérêt. Par exemple, l'individu « *Machine* » peut être considéré comme une instance de la classe « *Ressources* », et l'individu « *Panne* » peut être considéré comme une instance de la classe « *Défaillances des ressources* ».

³ W3C : *World Wide Web Consortium*.

⁴ Une logique est « *décidable* » si les algorithmes basés sur cette logique se terminent en un temps fini.

Les propriétés sont des relations binaires entre individus. Plus précisément, une propriété définit une relation entre deux individus. Par exemple, la propriété « *agresse* » lie l'individu « *Panne* » à l'individu « *Machine* ».

Les classes peuvent être interprétées comme des ensembles qui contiennent des individus. Les classes sont une représentation concrète des concepts du domaine de discours. Une classe est définie en utilisant une description mathématique formelle qui précise les conditions (nécessaires et/ou nécessaires et suffisantes) d'appartenance à la classe. Par exemple, la classe « *Défaillance des Ressources* » contient tous les individus qui correspondent à des problèmes de ressources, comme par exemple une « *panne machine* », un « *blocage d'un produit* », ou « *casse d'un outil* ». Un individu peut appartenir à plusieurs classes.

Les classes peuvent être organisées en une taxonomie, c'est-à-dire une hiérarchie de super classes et de sous-classes. Les sous-classes spécialisent leurs super classes. Par exemple, la classe « *Défaillance des Ressources* » est une sous classe de la classe « *Perturbations* » et permet de la spécialiser.

Le langage OWL permet de créer des *restrictions* sur les propriétés. Les restrictions décrivent des contraintes sur les relations auxquelles les individus prennent part pour une propriété donnée et permettent de définir de manière formelle les conditions d'appartenance à une classe.

A la lumière des concepts immunitaires jusqu'à présent mis en valeur, ces notions élémentaires de classe, de propriété et de restriction vont nous permettre de gérer les connaissances sur les perturbations dans une ontologie dédiée à cet effet. Pour développer cette ontologie, nous utilisons le logiciel Protégé [Protégé, 2000].

Protégé est une plateforme libre et gratuite qui jouit d'une communauté grandissante d'utilisateurs, et qui offre un ensemble d'outils pour construire des modèles de domaines et des applications à base de connaissances en utilisant les ontologies. Cette plateforme met en œuvre un ensemble riche de structures de modélisation de connaissances, et des actions qui permettent la création, la visualisation et la manipulation d'ontologies dans différents formats de représentation.

Protégé peut être personnalisé pour offrir un support convivial d'aide à la création de modèles de connaissances et pour l'acquisition de connaissances. Enfin, Protégé peut être étendu grâce à une architecture à base de modules d'extension, « *plug – in* », et une interface de programmation (« *API* ») basée sur le langage JAVA pour la construction d'outils et d'applications à base de connaissances.

4.6. Ontologie pour la gestion des connaissances sur les perturbations

Dans cette section, on se propose de concevoir une ontologie permettant de capitaliser les connaissances sur les perturbations dans un système de production. Cette modélisation sera guidée par les concepts immunitaires précédemment déterminés. Ces derniers nous permettent, en effet, de fixer le choix des classes, la manière de les hiérarchiser et la manière de définir des relations entre elles.

4.6.1. Gestion des spécifications

Le système immunitaire artificiel doit disposer des spécifications du système de production afin de pouvoir créer un tissu de cellules artificielles et le piloter contre les perturbations. Le système immunitaire artificiel utilise ces spécifications pour déterminer la nature des perturbations qui menacent le système de production.

Afin de gérer ces spécifications, un concept de l'ontologie est dédié à la capitalisation de ces informations. Ce concept est implémenté sous la forme d'une classe nommée « *PRR* », comme « *Pattern Recognition Receptor* ». Chaque instance (individu) de cette classe sert à décrire une spécification du système de production, utilisée à la fois dans la définition du tissu de cellules artificielles, et dans la détection de perturbations.

La [Figure 4.9](#) représente un extrait du diagramme de classe UML qui permet d'illustrer la mise en œuvre du concept « *PRR* ».

En termes d'organisation, la classe « *PRR* » est spécialisée (niveau 1) en quatre sous classes accueillant respectivement les spécifications de temps, de qualité, de coût et les valeurs cibles des indicateurs de performance du système de production. Chaque sous classe peut encore être spécialisée (niveau 2) en des sous classes qui reflètent les exigences selon différents points de vue, tels que les clients, les fournisseurs, les ressources, les produits et l'environnement. Le dernier niveau de la taxonomie du concept « *PRR* » est utilisé dans la caractérisation des classes de perturbations, mais nous reviendrons sur ce point dans la [section 4.6.4](#).

Le diagramme UML de la [Figure 4.9](#) peut être mis en œuvre par une taxonomie dans le logiciel Protégé comme l'illustre la [Figure 4.10](#) correspondant à l'implémentation de la [figure 3.12](#) du chapitre précédent. Dans ce cas, les classes UML vont correspondre à des classes d'ontologie, et les attributs de classe vont correspondre à des propriétés d'ontologie.

La [Figure 4.10](#) illustre la mise en œuvre du concept « *PRR* » dans l'ontologie et la saisie d'un individu de cette classe. Cet individu (« *MCHIPress_I* ») représente une spécification de réglage de la pression de la ressource machine « *MCHI* » lorsque cette machine exécute une opération de fabrication de l'article « *SFI* ». Dans ce cas, pour un fonctionnement normal, la pression mesurée doit être comprise entre une valeur minimale (90) et une valeur maximale (110) de pression.

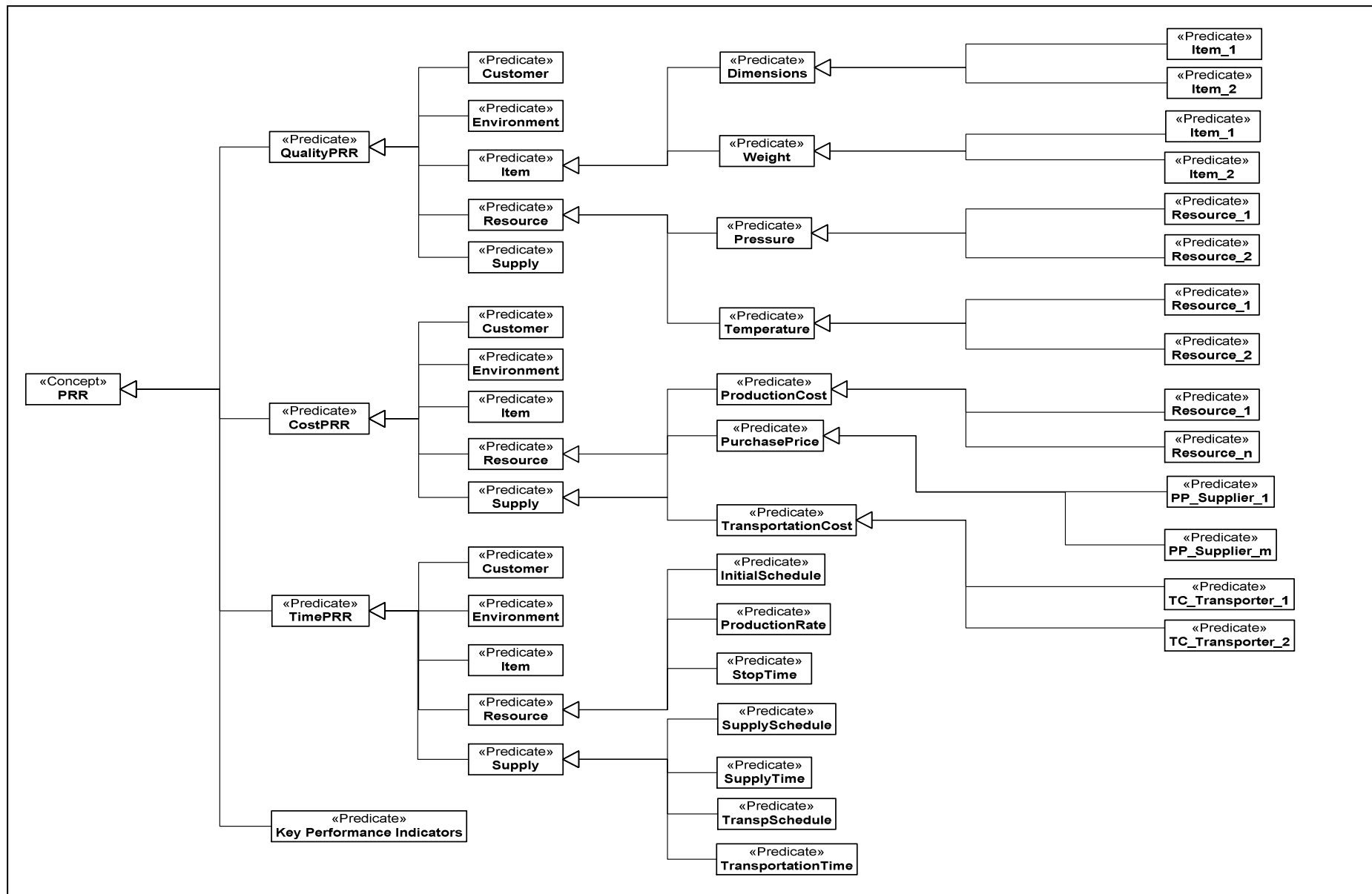


Figure 4.9: Extrait de la mise en oeuvre du concept de « PRR ».

Implémentation et hiérarchie de la classe PRR pour la gestion des spécifications standards et des valeurs nominales des indicateurs de performance.

Exemple de saisie d'un individu de la classe PRR. Il s'agit de la déclaration d'une spécification de pression.

Saisie de la valeur minimale et maximale de la spécification.

Saisie de la ressource sur laquelle l'article est fabriqué.

The screenshot displays the Protégé ontology editor interface. On the left, the 'Class Hierarchy' pane shows a tree structure starting from 'AISMetaModel', with 'PRR' expanded to show subclasses like 'CostPRR', 'QualityPRR', and 'TimePRR'. 'QPRR_MCH1Press (1)' is selected. The main workspace is divided into three panes: 'INSTANCE' (showing 'MCH1Press_1' as an asserted instance of 'QPRR_MCH1Press'), 'INDIVIDUAL' (showing the instance's properties), and 'PROPERTY' (showing the 'hasMinPressure' and 'hasMaxPressure' properties). The 'hasMinPressure' property is set to 90 (double), and 'hasMaxPressure' is set to 110 (double). The 'PRRWhere' property is set to 'MCH1'. The 'PRRWhat' property is set to 'SF03'. The 'Annotation' pane is also visible on the right.

Figure 4.10: Extrait de la mise en œuvre du concept « PRR » dans l'ontologie.

4.6.2. Gestion des mesures hors spécifications

Les mesures (états de capteurs, indicateurs de performance, etc.) acquises à partir des systèmes d'information et de suivi de production correspondent à autant d'évènements dont certains peuvent révéler des perturbations.

Afin de gérer les mesures hors spécifications, un concept de l'ontologie est dédié à la capitalisation de ces évènements révélateurs de perturbations. Ce concept est implémenté sous la forme d'une classe « *antigène* ». Chaque instance (individu) de cette classe correspond à la description d'un attribut de la perturbation, et sert à saisir des valeurs mesurées et/ou estimées qui ne satisfont pas les spécifications requises.

La [Figure 4.11](#) représente un extrait du diagramme de classe UML qui permet d'illustrer la mise en œuvre du concept « *antigène* ».

En termes d'organisation, la classe « *antigène* » est spécialisée (niveau 1) en quatre sous classes accueillant respectivement les mesures de temps, de qualité, de coût et les valeurs calculées ou mesurées des indicateurs de performance du système de production. Chaque sous classe peut encore être spécialisée (niveau 2) en des sous classes qui reflètent les défaillances selon différents points de vue, tels que les clients, les fournisseurs, les ressources, les produits et l'environnement.

Le dernier niveau (niveau 4) de la taxonomie est utilisé dans la gestion des signaux de danger et dans la détection des actions de pilotage appropriées, mais nous reviendrons sur ces points dans les sections correspondantes.

L'appartenance à la classe *antigène* est restreinte par des conditions nécessaires qui relient l'*antigène* au *pathogène* (perturbation) qui l'a généré et aux cellules (entités ou activités) affectées du système de production. Ainsi, en saisissant un individu de la classe « *antigène* », il est nécessaire de spécifier le *pathogène* (la perturbation) à laquelle il se rapporte, et la cellule (entité du système de production) qu'il agresse.

La [Figure 4.12](#) illustre la mise en œuvre du concept « *antigène* » dans l'ontologie et la saisie d'un individu de cette classe. Cet individu (« *QAg_PressFail_MCHI_1* ») représente une mesure de pression qui se situe en dehors de la spécification de pression, précédemment définie comme un individu de la classe « *PRR* » (cf. [Figure 4.10](#)). En effet, la pression mesurée est 150, alors que la mesure devrait se trouver entre 90 et 110. L'*antigène* est relié au *pathogène* (perturbation « *MCHI_panne_1* ») et à la cellule agressée (ressource de production « *MCHI* »).

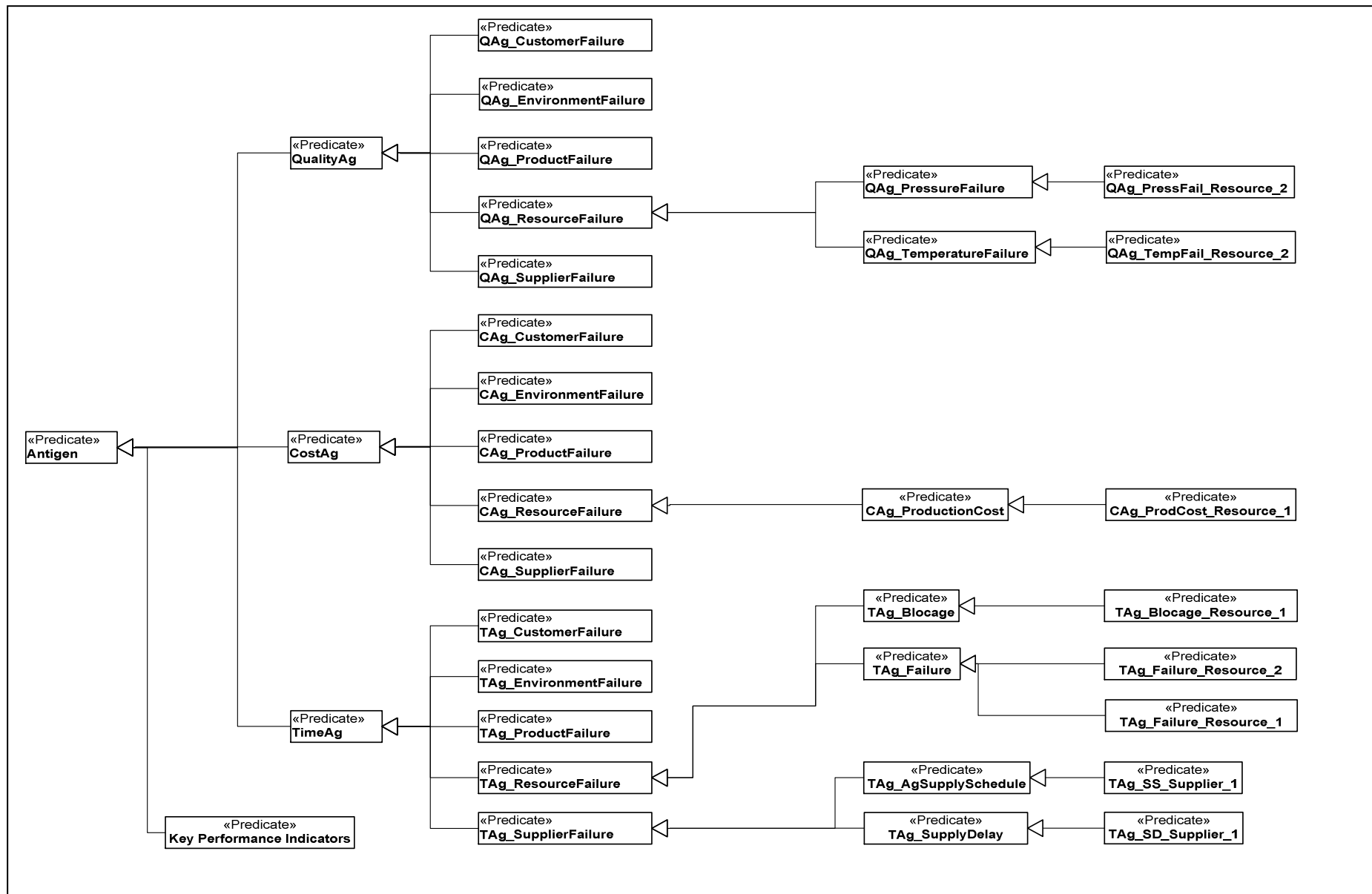


Figure 4.11: Extrait de la mise en oeuvre du concept d'« antigène ».

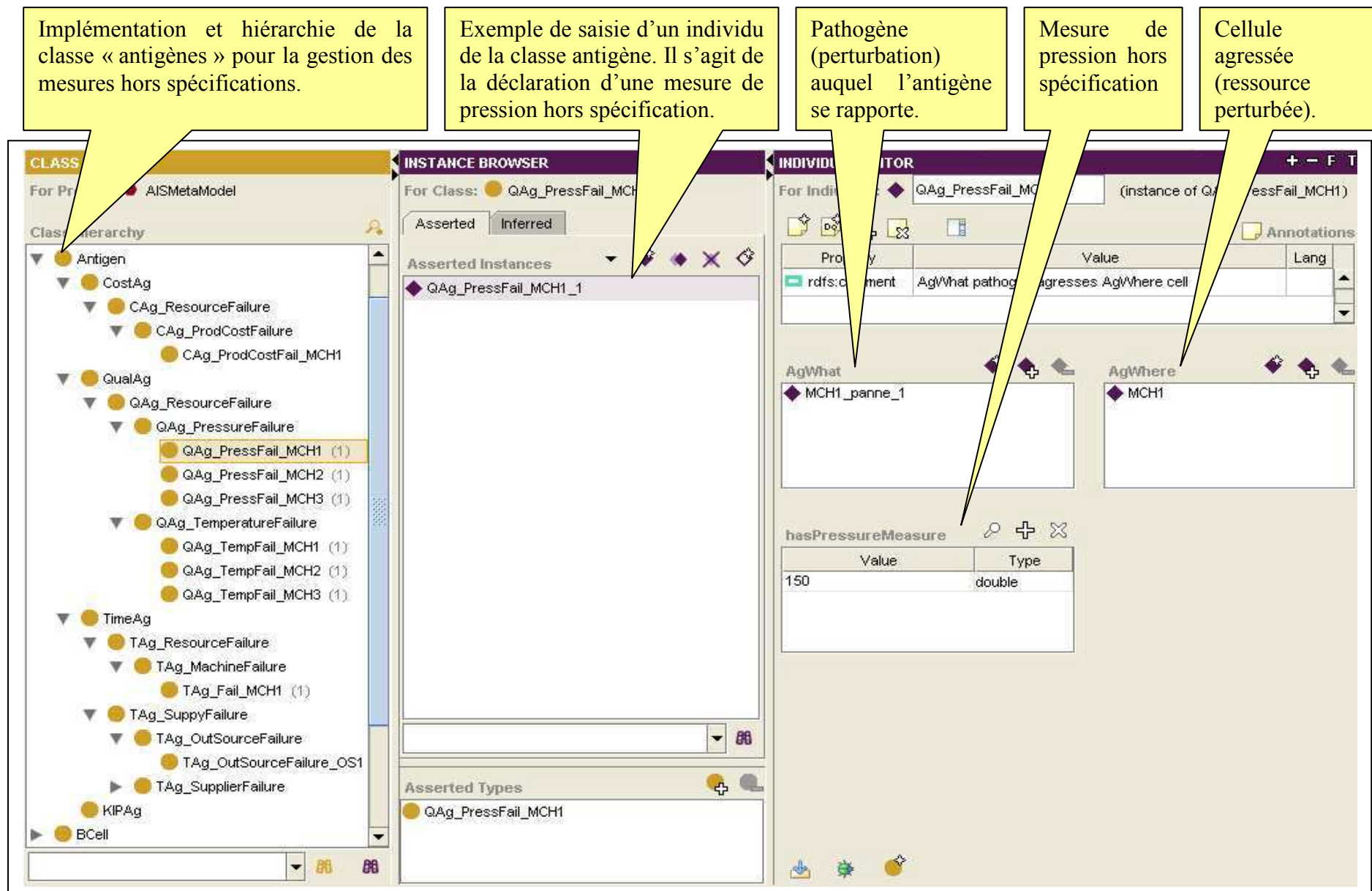


Figure 4.12: Extrait de la mise en œuvre du concept « antigène » dans l'ontologie.

4.6.3. Gestion des perturbations

Le concept de perturbation est pris en compte dans l'ontologie par une classe « *pathogène* », mise en œuvre tel que l'illustre le diagramme UML de la Figure 4.13.

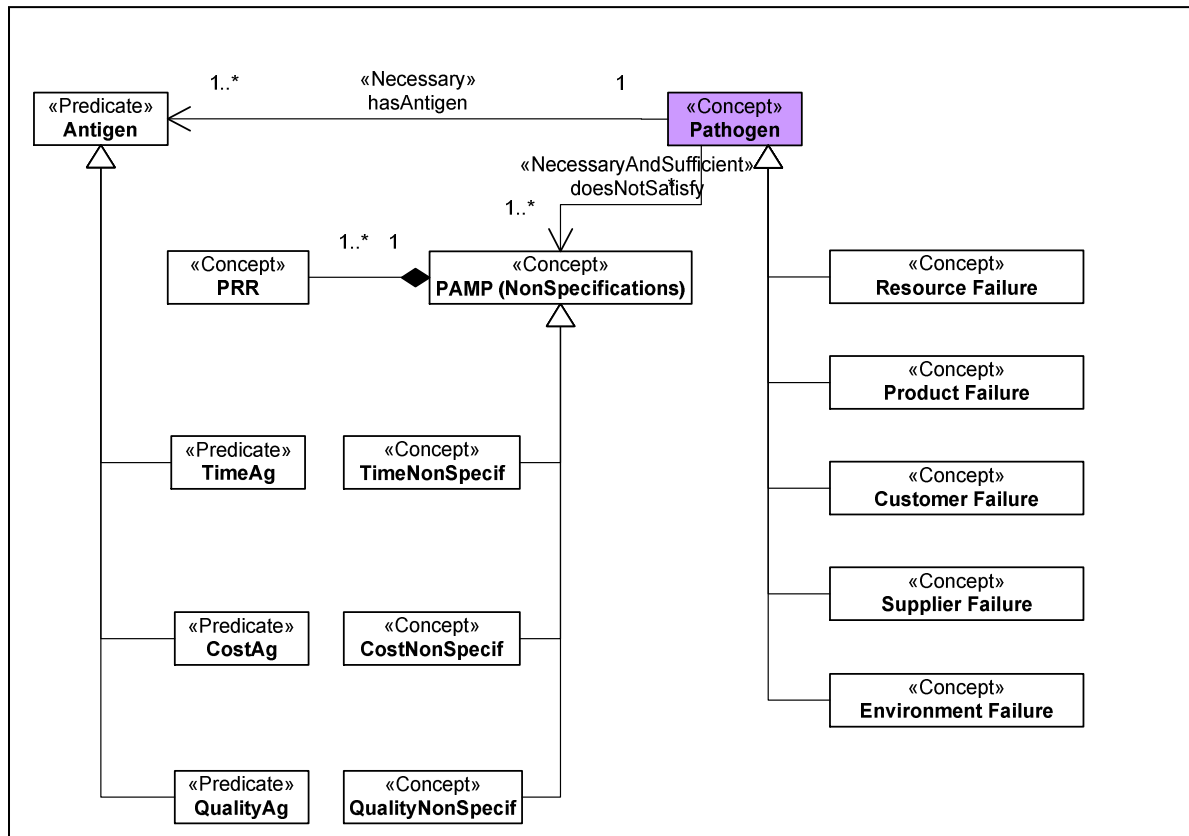


Figure 4.13: Mise en œuvre du concept de « pathogène ».

Les perturbations sont organisées en une taxonomie de classes qui héritent de la classe « *pathogène* », telles que par exemple la classe « *défaillances des ressources* », « *défaillances des fournisseurs* », etc.

Chaque classe de perturbation est formellement caractérisée par des attributs nécessaires et suffisants qui définissent les conditions d'appartenance à la classe, comme on le verra plus en détail dans la section 5.6.4 consacrée à la caractérisation des perturbations. Ces attributs sont les spécifications dont la non réalisation ou le non respect implique une perturbation. Nous représentons ces non spécifications en utilisant la classe « *PAMP* ». Un individu de la classe « *PAMP* » est composé d'individus de la classe « *PRR* ».

La description des attributs d'une perturbation est prise en compte par les antigènes qui sont des attributs nécessaires de la classe « *pathogène* ». Ainsi, un individu de la classe « *PAMP* » renseigne les non spécifications dont la réalisation conduit à la détection d'une perturbation. Un individu de la classe « *antigène* » décrit la mesure qui ne respecte pas les spécifications.

La Figure 4.14 illustre la mise en œuvre du concept « *pathogène* » dans l'ontologie et la saisie d'un individu de cette classe.

Implémentation et hiérarchie de la classe « pathogènes » pour la mémorisation des perturbations.

Saisie d'un individu de la classe « pathogènes » qui représente une perturbation de type panne de la ressource machine 1.

Saisi des antigènes temps. Ici, il s'agit du résultat de l'estimation de la durée de la panne.

Protégé signale les restrictions nécessaires, ou bien nécessaires et suffisantes en rouge afin de les renseigner.

Spécifications (individus de la classe PRR) dont la non satisfaction a conduit à la détection de la perturbation.

Définition du PAMP du pathogène.

Sous classe de pathogène que nous sommes en train de visualiser.

Saisie des antigènes qualité. Ce sont les mesures (de température et de pression) acquises depuis le système de production qui ne respectent pas les spécifications (PRR).

Figure 4.14: Extrait de la mise en œuvre du concept « pathogène » dans l'ontologie.

La mise en œuvre du concept « *pathogène* » correspond à l'implémentation dans l'ontologie de la [figure 3.9](#) du chapitre précédent. La saisie d'un individu correspond quand à elle à l'implémentation dans l'ontologie de la [figure 3.11](#) du chapitre précédent.

Dans la [Figure 4.14](#), une perturbation de type panne machine 1 est saisie en tant qu'individu de la classe « *Fail_MCH1* » qui regroupe les pannes de la machine 1. Cet individu est une instance appelée « *MCH1_panne_1* ». La propriété « *doesNotSatisfy* » permet de décrire les spécifications non respectées par cette perturbation. Dans cet exemple, il s'agit de spécifications de réglage de température (« *MCH1Temp_1* ») et de pression (« *MCH1Press_1* »). La propriété « *hasQualAg* » permet de donner l'antigène de température (« *QAg_TempFail_MCH1_1* ») et de pression (« *QAg_PressFail_MCH1_1* ») représentant les mesures qui sont hors spécification. La propriété « *hasTimeAg* » permet de donner l'antigène temps (« *TAg_Fail_MCH1_1* ») qui représente une estimation de la durée de la panne. Cet antigène affecte la spécification d'ordonnancement initial des opérations programmées sur la machine en panne, générant un signal de danger comme on le verra dans la [section 4.6.6](#) (précisément, dans la [Figure 4.20](#) de cette section) consacrée à l'illustration de la gestion des dangers.

La classe « *pathogène* » est destinée à accueillir et à mémoriser les occurrences de perturbations. Chaque perturbation est décrite moyennant les antigènes qui permettent de saisir différents attributs de la perturbation, tels que sa durée, ses symptômes ou les coûts qu'elle induit. La classe pathogène permet ainsi de constituer un historique qui peut servir à mieux caractériser de nouvelles occurrences de perturbations. Etant donnés des symptômes d'une perturbation, on peut examiner cet historique à la recherche des perturbations ayant des symptômes similaires et en déduire une estimation de la durée et des coûts que la nouvelle perturbation risque d'engendrer.

4.6.4. Caractérisation des classes de perturbations

Une classe de l'ontologie peut être formellement définie par la spécification de conditions nécessaires et suffisantes d'appartenance à la classe. Ainsi, chaque individu de la classe vérifie nécessairement ses conditions d'appartenance. Et réciproquement, il est suffisant qu'un individu vérifie les conditions d'appartenance à une classe pour qu'il appartienne à cette classe, c'est-à-dire pour qu'il soit une instance de cette classe.

Une ontologie OWL DL permet de mettre en œuvre ce principe et de l'utiliser pour déterminer le type de perturbation qui menace le système de production à partir des événements acquis. Ceci est réalisé en définissant des conditions « nécessaires » et des conditions « nécessaires et suffisantes » d'appartenance pour chacune des classes de perturbations. Ces conditions nécessaires et suffisantes sont définies en utilisant des restrictions. Dans une ontologie OWL DL, les restrictions sont des expressions logiques qui utilisent des opérateurs logiques de quantification existentielle (\exists) et/ou universelle (\forall) pour restreindre et spécifier les conditions d'appartenance à une classe.

Ainsi, dans le cas d'une classe de perturbation, les non spécifications sont utilisées pour définir les conditions nécessaires et suffisantes d'appartenance à la classe, et les antigènes sont utilisés pour définir les conditions nécessaires d'appartenance à la classe.

Par exemple, la [Figure 4.15](#) permet d'illustrer la caractérisation de la classe de perturbations « *pannes machine 1* ». Le [Tableau 4.9](#) permet de synthétiser la définition de la classe.

On remarque que les conditions nécessaires et suffisantes d'appartenance à la classe sont données par le non respect des spécifications de température et de pression de la ressource de production machine 1 « *MCH1* ». Ces non spécifications ont déjà été renseignées en tant qu'individus de la classe « *PRR* », dans la rubrique PRR qualité (« *QualityPRR* »), dans les sous classes « *MCH1Press* » et « *MCH1Temp* » qui sont situées au dernier niveau de la taxonomie du concept « *PRR* ». Une perturbation de type « *panne machine 1* » est détectée si l'évaluation des conditions nécessaires et suffisantes est vraie pour des mesures de température ou de pression données.

La rubrique conditions nécessaires de la classe permet d'enregistrer les mesures hors spécifications – acquises depuis les systèmes d'information et de suivi de production – ayant conduit à la détection de la perturbation, en tant qu'antigènes qualité. Les autres antigènes de coût et de temps seront quant à eux estimés.

L'utilisation des restrictions pour définir les conditions nécessaires et suffisantes, ainsi que les conditions nécessaires d'appartenance à une classe, permettent d'illustrer non seulement la nature, mais aussi la manière avec laquelle les connaissances et les informations sont déclarées puis gérées dans le système ARTIMOS.

Tableau 4.9: définition de la classe « pannes machine 1 ».

Classe	« Fail_MCH1 »	Classe des pannes de la machine 1
Non spécifications	« MCH1Press »	Spécification de pression dont le non respect induit une perturbation
	« MCH1Temp »	Spécification de température dont le non respect induit une perturbation
Conditions nécessaires et suffisantes	$\exists \text{doesNotSatisfy} \quad \text{some or}$ (MCH1Press MCH1Temp)	Une panne de la machine 1 est détectée si l'évaluation de cette restriction est vraie pour des mesures de température ou de pression données
Conditions nécessaires	$\exists \text{hasCostAg} \quad \text{some}$ CAg_ProdCost_MCH1	Mesure ou estimation du coût de production
	$\exists \text{hasQualAg} \quad \text{some or}$ (QAg_Press_MCH1 QAg_Temp_MCH1)	Mesure des paramètres qualité non respectés (température et/ou pression)
	$\exists \text{hasTimeAg} \quad \text{some}$ TAg_MF_MCH1	Mesure ou estimation de la durée de la panne

Implémentation et hiérarchie de la classe « pathogènes » pour la mémorisation des perturbations.

Sous classe de pathogène que nous sommes en train de visualiser.

Définition des PAMP en tant que restrictions nécessaires et suffisantes.

Définition des antigènes en tant que restrictions nécessaires.

Les pathogènes sont disjointes. Par exemple, les pannes d'une machine sont disjointes des pannes d'une autre machine

The screenshot displays the AISMetaModel software interface, which is divided into several panes. On the left is the 'SUBCLASS EXPLORER' pane, showing a hierarchical tree of classes. The 'Pathogen' class is expanded, revealing sub-classes like 'CustomerFailure', 'OrderCancellation', 'RushOrder', 'ProductFailure', 'InventoryFailure', 'NonConformity', 'Waste', 'ResourceFailure', 'Blockage', 'Failure', and 'SupplierFailure'. The 'Failure' class is further expanded, showing 'Fail_MCH1' and 'Fail_MCH2'. The main pane is the 'CLASS EDITOR', which is currently editing the 'Fail_MCH1' class. It shows a table of properties with columns for 'Property', 'Value', and 'Lang'. The 'rdfs:comment' property is set to 'ensemble des pannes de la machine'. Below the table, there are 'Asserted Conditions' and 'Disjoints' sections. The 'Asserted Conditions' section lists several conditions, including 'doesNotSatisfy some (QPRR_MCH1Press or QPRR_MCH1Temp)', 'Failure', 'hasCostAg some CAg_ProdCostFail_MCH1', 'hasQualAg some (QAg_PressFail_MCH1 or QAg_TempFail_MCH1)', and 'hasTimeAg some TAg_Fail_MCH1'. The 'Disjoints' section shows 'Fail_MCH1' and 'Fail_MCH2' as disjoint classes. The bottom of the interface has a status bar with 'Logic View' and 'Properties View' buttons.

Figure 4.15: Illustration de la caractérisation d'une classe de perturbations.

4.6.5. Gestion des cellules artificielles

Le concept de cellule trouve sa matérialisation dans l'ontologie sous forme d'une classe « cellule ». La Figure 4.16 introduit un diagramme UML qui illustre la mise en œuvre de ce concept.

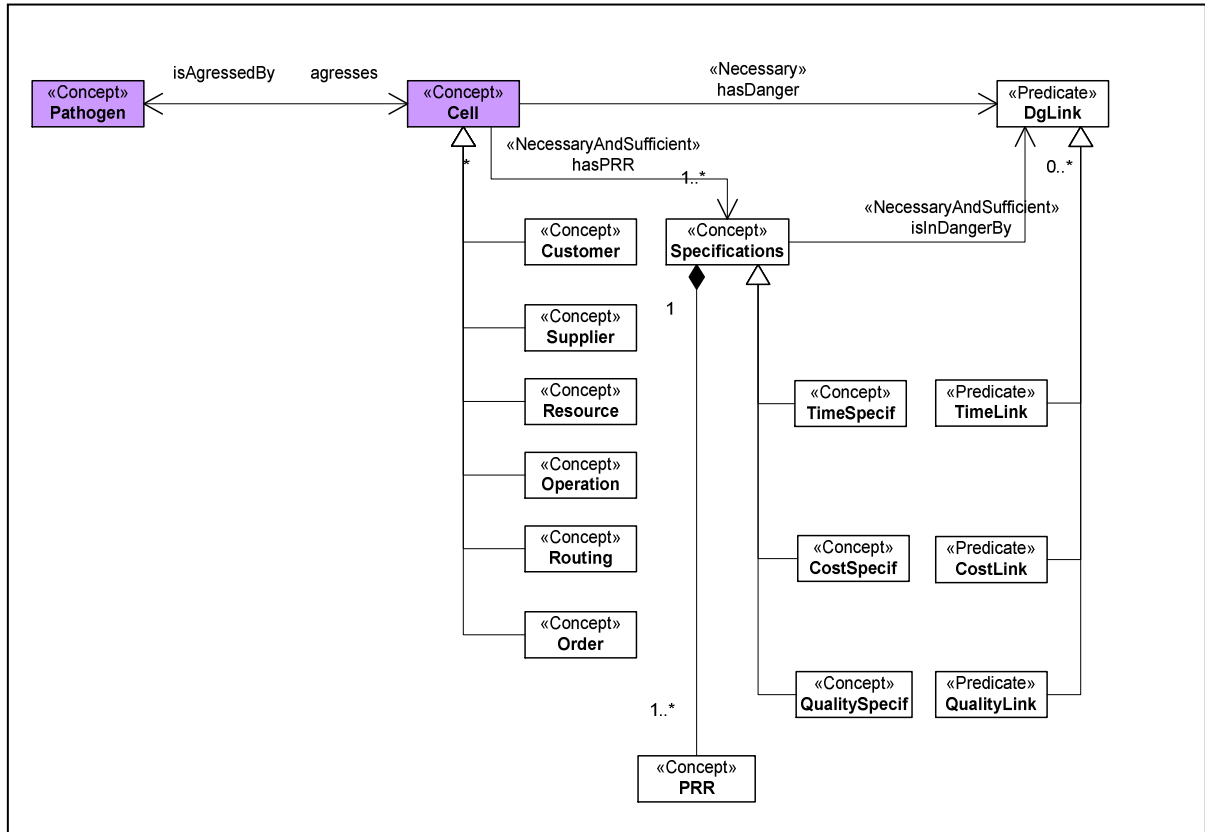


Figure 4.16: Mise en œuvre du concept de cellule de l'organisme.

Le concept de cellule englobe toute entité physique ou logique du système de production, telles que les clients, les fournisseurs, les ressources de production, etc. chacune de ces entités peut être représentée par une classe qui hérite de la classe « cellule ».

Chaque classe « cellule » est formellement caractérisée par des attributs nécessaires et suffisants qui sont les spécifications. Ces spécifications définissent les conditions de bon fonctionnement de la cellule, en dehors desquelles une anomalie est probablement en train de se produire. Ces spécifications sont renseignées en utilisant les individus préalablement enregistrés dans la classe « PRR ».

Les spécifications des cellules peuvent être agressées par les antigènes libérés par les pathogènes détectés. Au niveau d'une classe « cellule », cette agression est prise en compte par des attributs nécessaires qui renseignent les liens mis en danger pour des antigènes donnés. Ces liens mis en danger seront pris en compte dans la classe « DgLink » et permettent d'identifier les conséquences indirectes des perturbations.

Les spécifications d'une cellule peuvent aussi être affectées par la mise en danger des spécifications des cellules environnantes. Cette situation est prise en compte par un attribut nécessaire et suffisant reliant la classe spécification à la classe des liens en danger. Cet attribut permet de préciser quelle spécification de la cellule est mise en danger par quel lien en danger des cellules environnantes.

La [Figure 4.17](#) correspond à l'implémentation de la [figure 3.5](#) du chapitre précédent. Elle illustre la mise en œuvre du concept « *cellule* » dans l'ontologie. Elle montre aussi un exemple de caractérisation d'une cellule (dans cet exemple, une cellule opération) en termes de conditions nécessaires, et de conditions nécessaires et suffisantes d'appartenance à la classe.

Dans cette figure, on remarque que les spécifications de la cellule opération sont prises en compte au niveau de la rubrique conditions nécessaires et suffisantes. Dans cet exemple, une cellule opération est spécifiée par un coût de production (« \exists *hasCostPRR* some *CPRR_ProductionCost* »), des réglages de température (« \exists *hasQualPRR* some *QPRR_Temperature* ») et de pression (« \exists *hasQualPRR* some *QPRR_Pressure* »), un ordonnancement initial (« \exists *hasTimePRR* some *TPRR_ResourceSchedule* »), une cadence de production (« \exists *hasTimePRR* some *TPRR_ProductionRate* ») et une tolérance de temps d'arrêt (« \exists *hasTimePRR* some *TPRR_StopTime* »).

La définition des liens en danger est prise en compte au niveau de la rubrique conditions nécessaires.

La [Figure 4.18](#) illustre un exemple de saisie d'une cellule opération. Dans cet exemple, un lien de danger (« *TLk_MCHIDgSched_3* ») est créé pour refléter la mise en danger du lien de spécification d'ordonnancement initial de l'opération (« *TPRR_MCHIInitSched_3* »). Ce lien de danger est détaillé dans la [Figure 4.20](#) de la [section 5.6.6](#) suivante.

Implémentation et hiérarchie de la classe « cellules » de l'organisme.

Sous classe de cellule que nous sommes en train de visualiser.

Définition des spécifications de la cellule en tant que restrictions nécessaires et suffisantes.

Définition des liens en dangers en tant que restrictions nécessaires.

Les cellules sont disjointes. Par exemple, les opérations sont disjointes des ressources.

The screenshot displays the CLASS EDITOR interface. On the left, a tree view shows the class hierarchy under 'AISMetaModel', including 'Antigen', 'BCell', 'Cell', 'Customer', 'Operation', 'Order', 'Product', 'Resource', 'Routing', and 'Supplier'. The 'Operation' class is selected. The central pane shows the 'CLASS EDITOR' for 'Operation', with a table of properties and values. The right pane shows 'Asserted Conditions' for 'Operation' and 'Cell' classes, including 'hasCostPRR', 'hasQualPRR', 'hasTimePRR', 'hasCostLk', 'hasQualLk', and 'hasTimeLk' with various restrictions. The bottom right corner shows 'Logic View' and 'Properties View' tabs.

Figure 4.17: Illustration de la caractérisation d'une cellule opération.

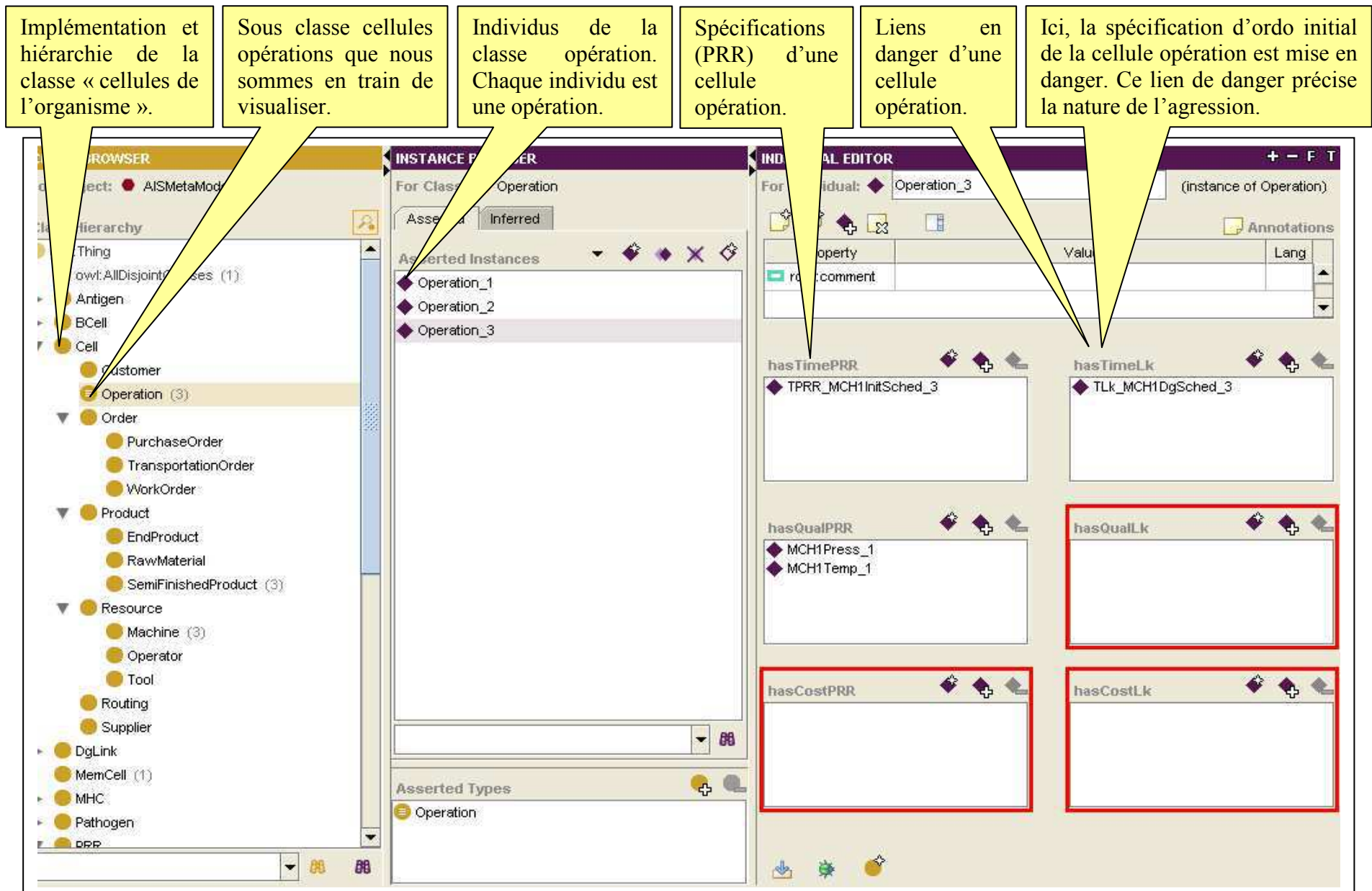


Figure 4.18: Illustration de la saisie d'une cellule opération.

4.6.6. Gestion du danger

La classe « *DgLink* » de la Figure 4.16 permet de structurer la prise en compte de la mise en danger des liens de spécification des cellules. Un lien de danger correspond à un lien de spécification directement agressé par une perturbation (un antigène) ou bien indirectement affecté par une conséquence de la perturbation (signaux de dangers émis par des cellules environnantes).

En termes d'arbre d'héritage, la classe « *DgLink* » est organisée de manière similaire à la classe « *PRR* ». Toutefois, les conditions nécessaires et suffisantes de la classe « *DgLink* » permettent de définir, pour chaque lien de spécification, les antigènes et les signaux de danger (liens en danger d'autres cellules) qui le mettent en danger.

La Figure 4.19 permet d'illustrer la caractérisation d'une classe de danger qui représente la modification de l'ordonnancement initial d'une opération sur une ressource. On remarque que deux blocs de conditions nécessaires et suffisantes définissent la classe. Le premier bloc liste les antigènes qui agressent la cellule. Le deuxième bloc liste les signaux de danger qui peuvent affecter la cellule.

La Figure 4.20 illustre un exemple de saisie d'un lien de danger d'une opération dont le lien de spécification d'ordonnancement initial est agressé par l'antigène temps d'un pathogène de type panne machine.

En effet, l'individu « *TLk_MCHIDgSched_3* » est une instance de la classe « *TLk_MCHIDgSched* » qui regroupe les liens de danger de modification d'ordonnancement initial des opérations dont l'exécution est initialement programmée sur la ressource machine 1.

La relation « *isAgressedBy* », qui est une condition nécessaire et suffisante, permet de renseigner l'antigène temps (« *Tag_Fail_MCHI_1* ») qui affecte la cellule opération et génère le lien de danger. La relation « *DgPRR* », qui est une condition nécessaire, permet de renseigner le lien de spécification d'ordonnancement initial de la cellule qui est mis en danger par l'antigène.

Plus généralement, la classe « *DgLink* » permet de répertorier les risques du système de production. Chaque classe de risque peut être définie par des restrictions qui définissent les conditions nécessaires et suffisantes d'appartenance à la classe. Ainsi, un évènement du système de production, qui satisfait les restrictions d'une classe de risque, correspond à un individu dont on peut inférer l'appartenance à la classe. Ceci équivaut à dire que le risque associé à la classe de risque peut potentiellement se produire dans le système de production. Il s'agit alors de déterminer sa probabilité d'occurrence.

Implémentation et hiérarchie de la classe « dangers ».

Sous classe liens d'ordo initial en danger que nous sommes en train de visualiser.

Une restriction nécessaire et suffisante permet de dire qu'un lien d'ordo initial est agressé par des antigènes issus de pathogènes de type panne machine par exemple.

Une deuxième restriction nécessaire et suffisante permet de dire qu'un lien d'ordo initial est mis en danger par des signaux de danger issus d'opérations affectées.

The screenshot shows the CLASS EDITOR interface with the following components:

- CLASS EXPLORER:** A tree view on the left showing the hierarchy of classes. The 'TLk_DgSchedule' class is selected under the 'TLk_Resource' class.
- CLASS EDITOR:** The main area on the right showing the details of the 'TLk_DgSchedule' class. It includes a table of properties, a list of asserted conditions, and a section for disjoints.

Properties Table:

Property	Value	Lang
rdfs:comment	MachineToOperat DgVWhat : what o DgVWhere : what DgPRR : what P	

Asserted Conditions:

- isAgressedBy **some** TAg_MachineFailure
- isInDangerBy **some** TLk_DgSchedule
- TLk_Resource
- DgPRR **some** TPRR_ResourceSchedule
- DgVWhat **some** Operation
- DgVWhere **some** Machine

Disjoints:

-

Logic View / Properties View:

Logic View is selected.

Figure 4.19: Illustration de la caractérisation d'une classe de danger.

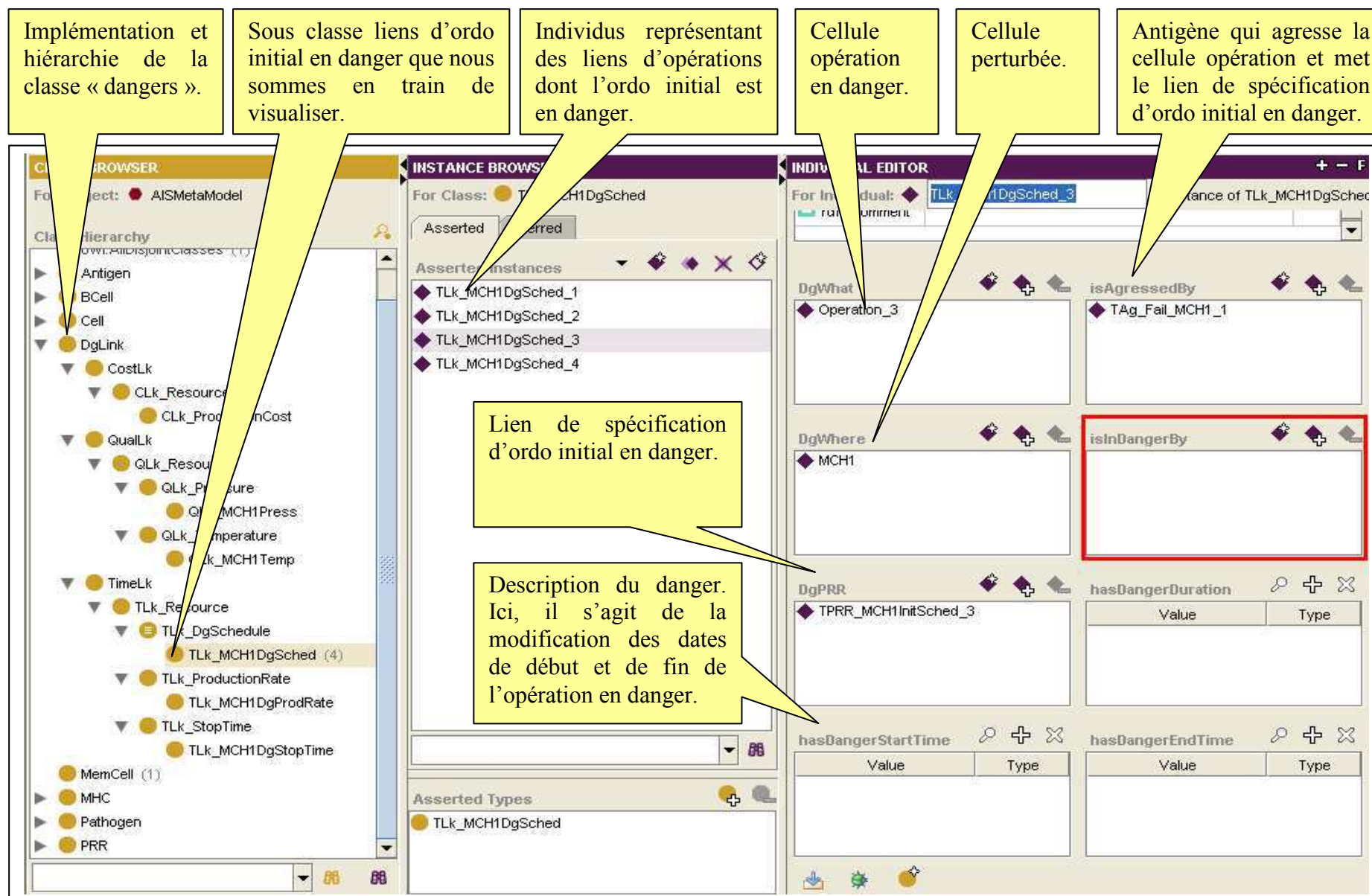


Figure 4.20: Exemple de saisie d'un lien d'ordonnancement initial d'une opération en danger.

4.6.7. Gestion des actions de pilotage

Cette étape consiste à déterminer les actions de pilotage qui peuvent apporter des éléments de réponse à la perturbation et à ses conséquences. Il s'agit d'activer les cellules B et les cellules mémoire capables d'intervenir sur les antigènes et les signaux de danger. La modélisation de ces cellules est respectivement présentée dans les sections suivantes.

4.6.7.1. Taxonomie des cellules B

Nous avons déjà distingué deux types de cellules B : celles qui correspondent à des actions de pilotage simples, et celles qui correspondent à des actions de pilotage composées. Cette section présente la taxonomie des cellules B, c'est-à-dire l'implémentation des actions de pilotage dans l'ontologie en tant que hiérarchie d'héritage de la classe « cellule B ». En effet, le concept de cellule B trouve sa matérialisation dans l'ontologie sous forme d'une classe « BCell », mise en œuvre conformément au diagramme UML de la [Figure 4.21](#).

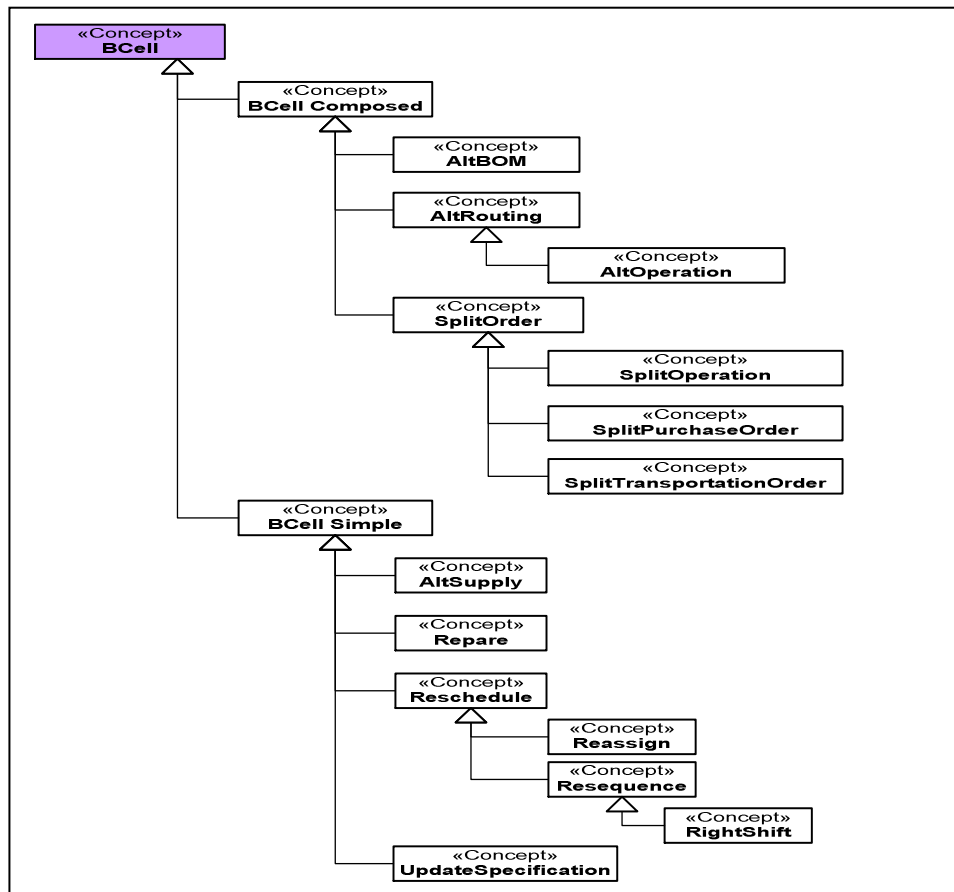


Figure 4.21: Taxonomie des actions de pilotage.

Le diagramme de la [Figure 4.21](#) illustre un extrait de la hiérarchisation des actions de pilotage. On distingue les actions de pilotage composées – qui permettent notamment de remplacer une activité par plusieurs activités équivalentes ou de subdiviser une activité en plusieurs activités – et les actions de pilotage simples qui permettent entre autres de chercher des substitutions, c'est-à-dire de remplacer des entités affectées par des entités équivalentes.

Chaque classe cellule B de l'ontologie peut être reliée à un logiciel de l'entreprise via l'agent cellule B associé, comme l'illustre la [Figure 4.22](#).

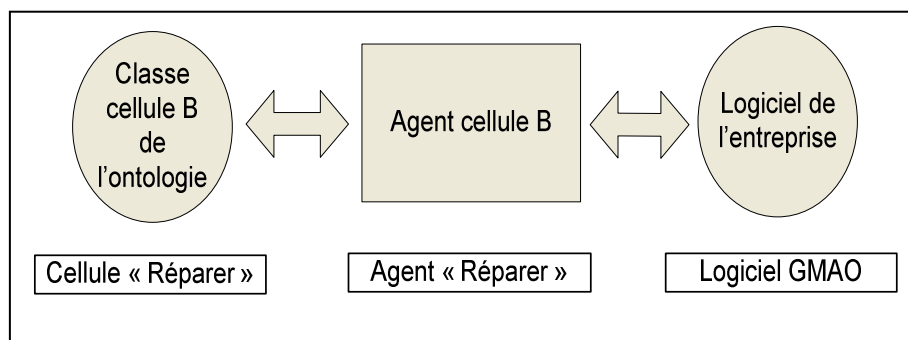


Figure 4.22: Interactions entre les classes d'ontologie, les agents cellules B et les logiciels d'entreprise.

Par exemple, l'agent cellule B « *Réparer* » intervient sur les perturbations de type « *défaillances des ressources* » (cette connaissance étant définie par les restrictions de la sous classe cellule B « *Réparer* » de l'ontologie) et peut être relié au système GMAO de l'entreprise. L'agent cellule B « *Réordonnancer* » (« *Reschedule* ») peut être relié au système APS, et l'agent cellule B « *Réapprovisionner* » (« *AltSupply* ») peut être relié au système SCM. L'idée consiste à dire qu'un agent cellule B consulte l'ontologie pour déterminer s'il est compétent pour intervenir sur des antigènes et/ou des signaux de danger (comme on le verra dans les [sections 5.6.7.3](#) et [5.6.7.4](#)). Dans l'affirmative, l'agent peut faire appel au logiciel de l'entreprise afin de l'impliquer dans la réaction à la perturbation.

4.6.7.2. Mémorisation des propositions des cellules B

Chaque cellule B correspond à une action de pilotage dont le résultat d'exécution constitue une proposition pour prendre en compte des antigènes et/ou des signaux de danger. Les propositions des cellules B sont gérées au niveau de la classe « *BMHC* » comme l'illustre le diagramme UML de la [Figure 4.23](#).

La relation « *Bpresent* » est une condition nécessaire permettant de relier une cellule B aux actions de pilotage qu'elle propose. Les propositions des cellules B sont présentées aux autres cellules immunitaires (Th et mémoire) sous forme d'individus de la classe « *BMHC* ».

La classe « *BMHC* » est reliée à la classe « *BBloc* » par une relation de composition. Dans le cas des cellules B simples, un individu de la classe « *BMHC* » est relié à un seul individu de la classe « *BBloc* ».

Par exemple, dans le cas d'une panne machine qui affecte une opération de production, la cellule B de réaffectation (« *Reassign* ») propose une machine de substitution vers laquelle l'opération affectée pourrait être réorientée. Cette proposition peut être stockée en tant qu'un individu de la classe « *BBloc_Reassign* ». Dans ce cas, la cellule B de réaffectation présente un individu de la classe « *BMHC* » composé d'un seul individu de la classe « *BBloc_Reassign* » contenant la machine de substitution.

Dans le cas des cellules B composées, un individu de la classe « *BMHC* » est relié à plusieurs individus de la classe « *BBloc* ».

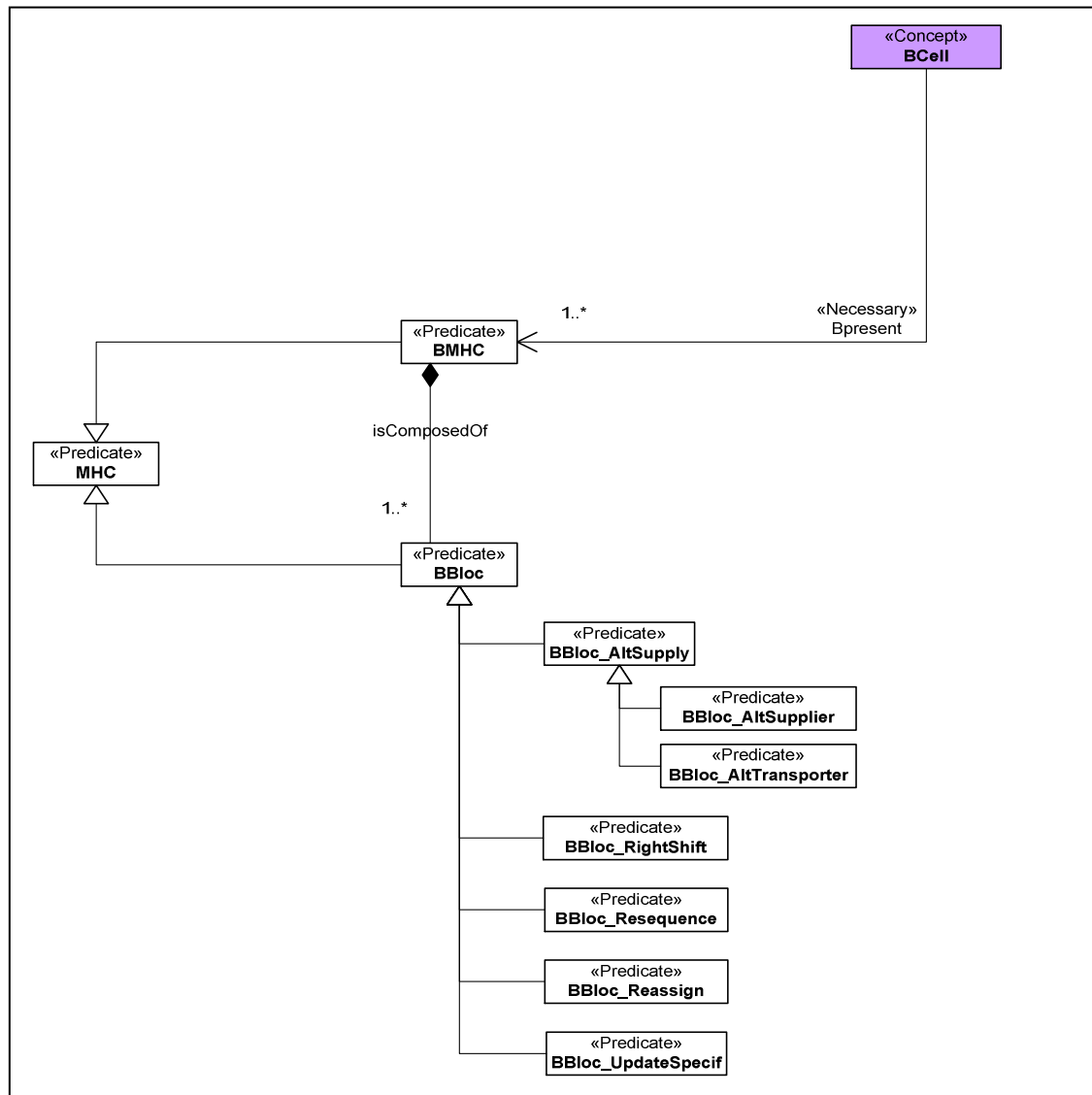


Figure 4.23: Mémorisation des propositions des actions de pilotage.

Par exemple, dans le cas d'un retard du fournisseur principal, la cellule B de subdivision d'un ordre d'achat (« *SplitPurchaseOrder* ») propose de subdiviser l'ordre d'achat initial en plusieurs ordres partiels destinés à plusieurs fournisseurs alternatifs. Chaque ordre partiel est stocké en tant qu'un individu distinct de la classe « *BBloc_AltSupplier* ». Dans ce cas, la cellule B de subdivision d'un ordre d'achat présente un individu de la classe « *BMHC* » composé de plusieurs individus de la classe « *BBloc_AltSupplier* » correspondant chacun à un ordre partiel.

4.6.7.3. Détermination de la compétence des cellules B simples

Nous utilisons les restrictions pour définir des conditions nécessaires et suffisantes permettant de préciser les antigènes qu'une cellule B simple peut détecter et les signaux de danger auxquels la cellule est sensible. Ces attributs nécessaires et suffisants précisent la compétence d'une cellule B simple pour intervenir sur des types particuliers d'antigènes et/ou de signaux de danger.

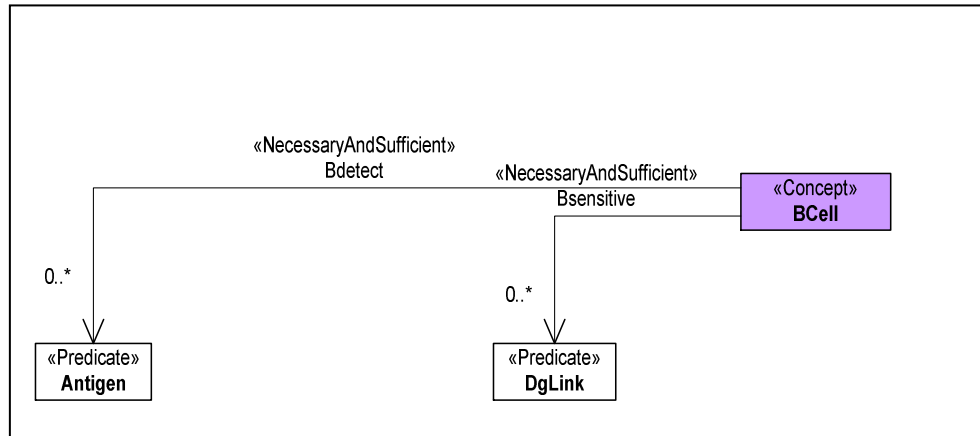


Figure 4.24: Détermination de la compétence des cellules B simples.

Dans la [Figure 4.24](#), nous définissons une restriction nécessaire et suffisante sur la relation « *Bdetect* » qui permet de relier une cellule B aux antigènes sur lesquels la cellule B peut intervenir. En présence d'un antigène particulier, il suffit de vérifier quelles cellules B sont reliées par la relation « *Bdetect* » avec ce type d'antigène pour déterminer la compétence de la cellule B à intervenir sur l'antigène.

Pareillement pour les signaux de danger, nous définissons une restriction nécessaire et suffisante sur la relation « *Bsensitive* » qui permet de relier une cellule B aux liens de danger sur lesquels la cellule B peut intervenir. En présence d'un lien de danger particulier, il suffit de vérifier quelles cellules B sont reliées par la relation « *Bsensitive* » avec ce type de lien de danger pour déterminer la compétence de la cellule B à intervenir.

La [Figure 4.25](#) montre la mise en œuvre du diagramme UML de la [Figure 4.21](#) dans l'ontologie, et illustre la définition de la compétence de la cellule B correspondant à une action de pilotage de réaffectation (« *Reassign* »). La cellule B de réaffectation est un type particulier d'une cellule de réordonnancement, qui est une cellule B simple. À titre d'exemple, la cellule B de réaffectation détecte les antigènes temps de type panne machine (« *Tag_MachineFailure* »), et est sensible aux signaux de danger de type modification de l'ordonnancement initial (« *TLk_DgSchedule* »). Les antigènes et les signaux de danger sont définis par des conditions nécessaires et suffisantes.

La [Figure 4.26](#) montre la saisie d'un individu de la classe cellule B de réaffectation. Cette figure illustre particulièrement comment saisir l'antigène détecté (moyennant la relation « *Bdetect* »), le signal de danger auquel la cellule est sensible (moyennant la relation « *Bsensitive* »), et enfin la proposition de la cellule B de réaffectation. Cette proposition, illustrée plus en détail dans la [Figure 4.27](#), est un individu de la classe « *BMHC* » (moyennant la relation « *Bpresent* »).

Dans la [Figure 4.27](#), comme la cellule B de réaffectation est une cellule B simple, sa proposition est saisie sous la forme d'un individu (« *BMHC_1* ») de la classe « *BMHC* », composé d'un seul individu (« *BBloc_Reassign_1* ») de la classe « *BBloc* ».

La [Figure 4.28](#) décrit plus en détail la proposition de la cellule B de réaffectation, proposition correspondant à l'individu (« *BBloc_Reassign_1* »). On remarque que la cellule B de

réaffectation supprime le lien de spécification d'ordonnancement initial de l'opération affectée et le remplace par un nouveau lien qui correspond à un nouvel ordonnancement.

Implémentation et hiérarchie de la classe « cellule B ».

Sous classe cellule B de réaffectation que nous sommes en train de visualiser.

Conditions nécessaires et suffisantes pour définir de la compétence de la cellule B de réaffectation à intervenir sur des opérations en danger lors de pannes de machines

Condition nécessaire pour recueillir la proposition de la cellule B de réaffectation

CLASS EXPLORER

For Project: AISMetaModel

Asserted Hierarchy

- owl:Thing
 - owl:AllDisjointClasses
 - Antigen
 - BCell
 - Composed
 - AltBOM
 - AltRouting
 - AltOperation
 - SplitOrder
 - SplitOperation
 - SplitProductionOrder
 - SplitPhaseOrder
 - SplitTransportationOrder
 - Simple
 - AltSupply
 - OutSource
 - Repair
 - Reschedule
 - Reassign**
 - Resequence
- Cell
 - Customer
 - Operation
 - Order

CLASS EDITOR

For Class: Reassign

Property	Value
rdfs:comment	

Asserted Conditions

- Bdetect some TAG_MachineFailure
- Bsensitive some TLK_DgSchedule
- Reschedule
- Bpresent some BMHC

Disjoints

Logic View Properties View

Figure 4.25: Illustration de la définition de la compétence d'une cellule B de réaffectation.

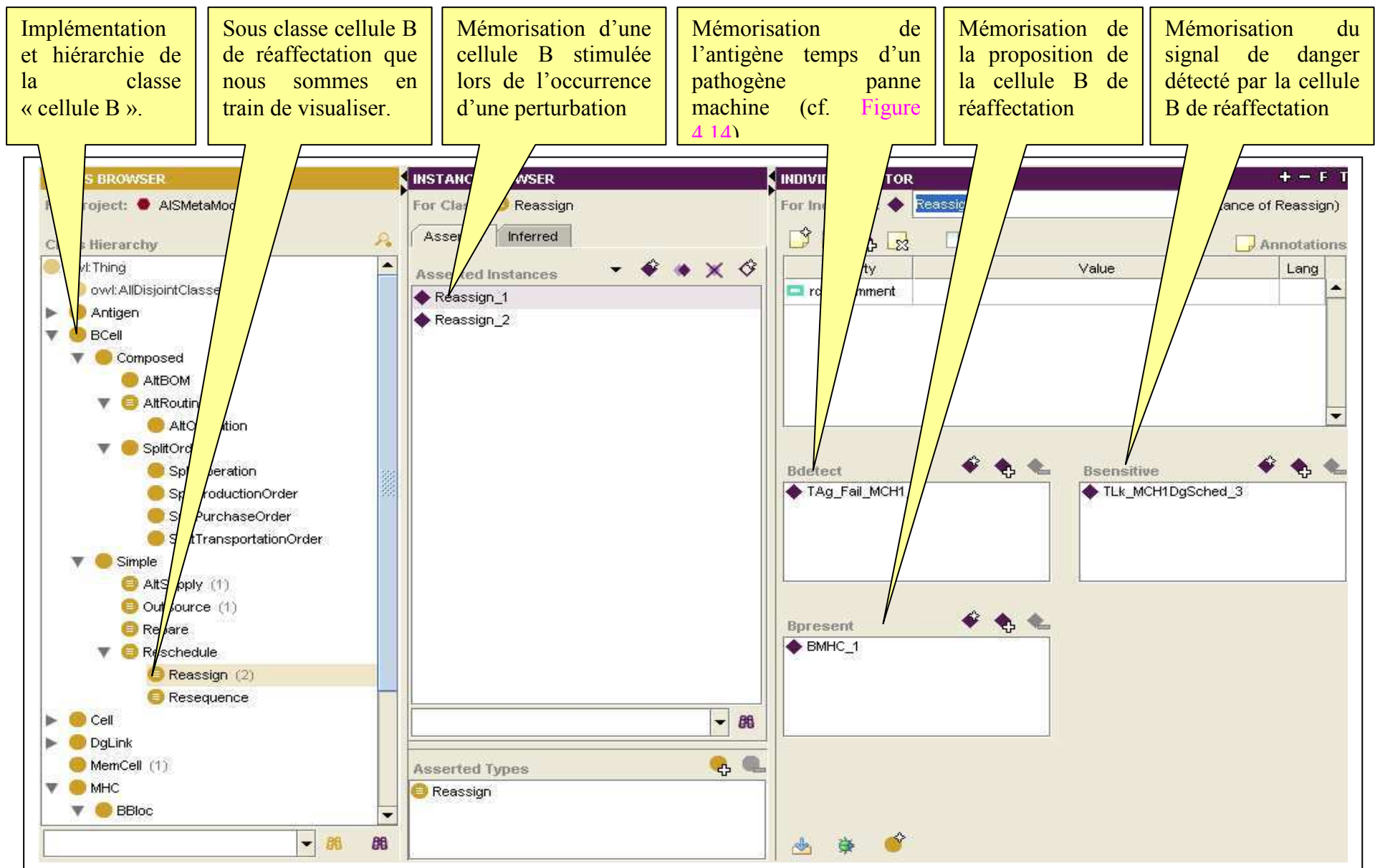


Figure 4.26: Illustration de la saisie d'un individu de la classe cellule B de réaffectation.

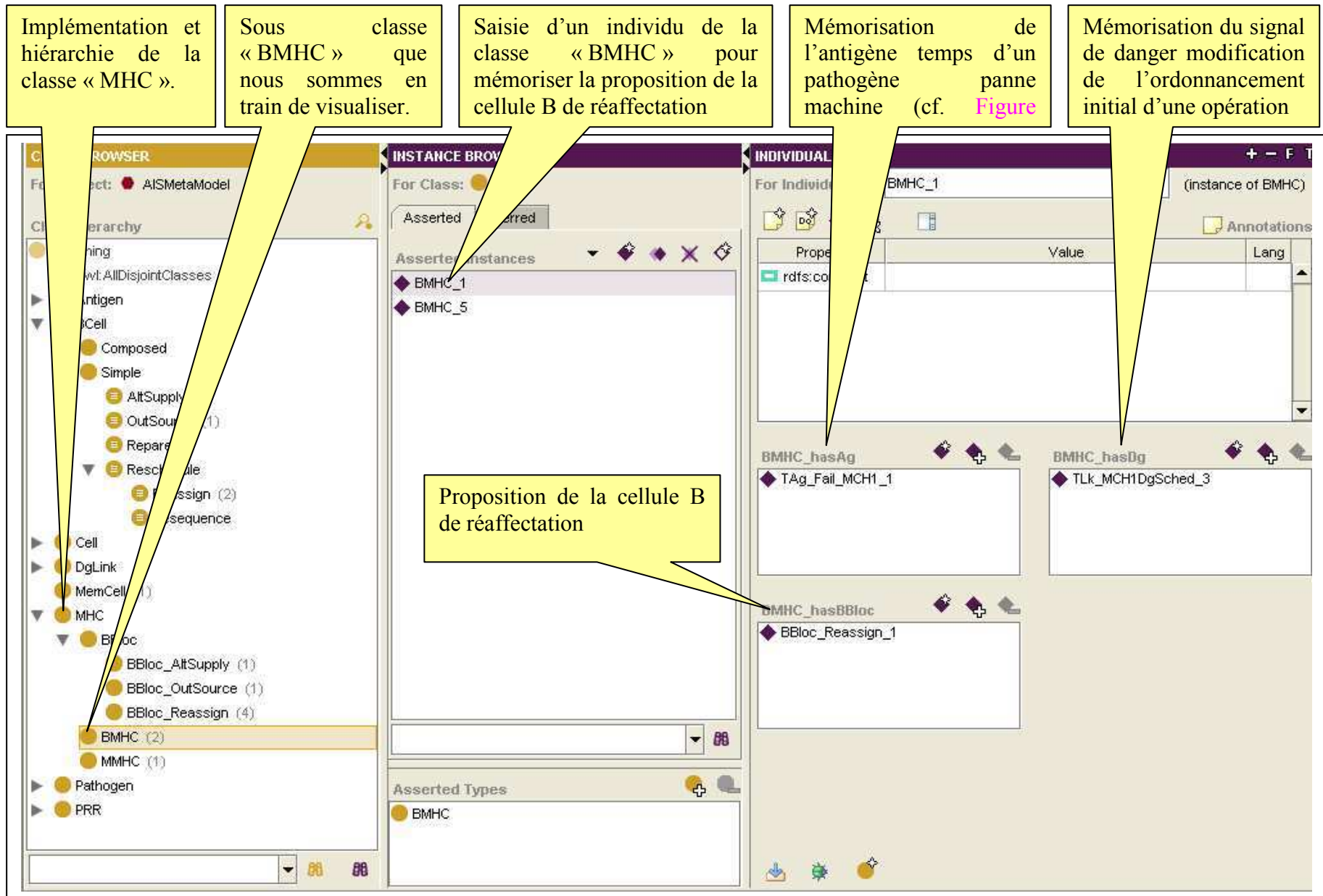


Figure 4.27: Illustration de la saisie de la proposition d'une cellule B de réaffectation.

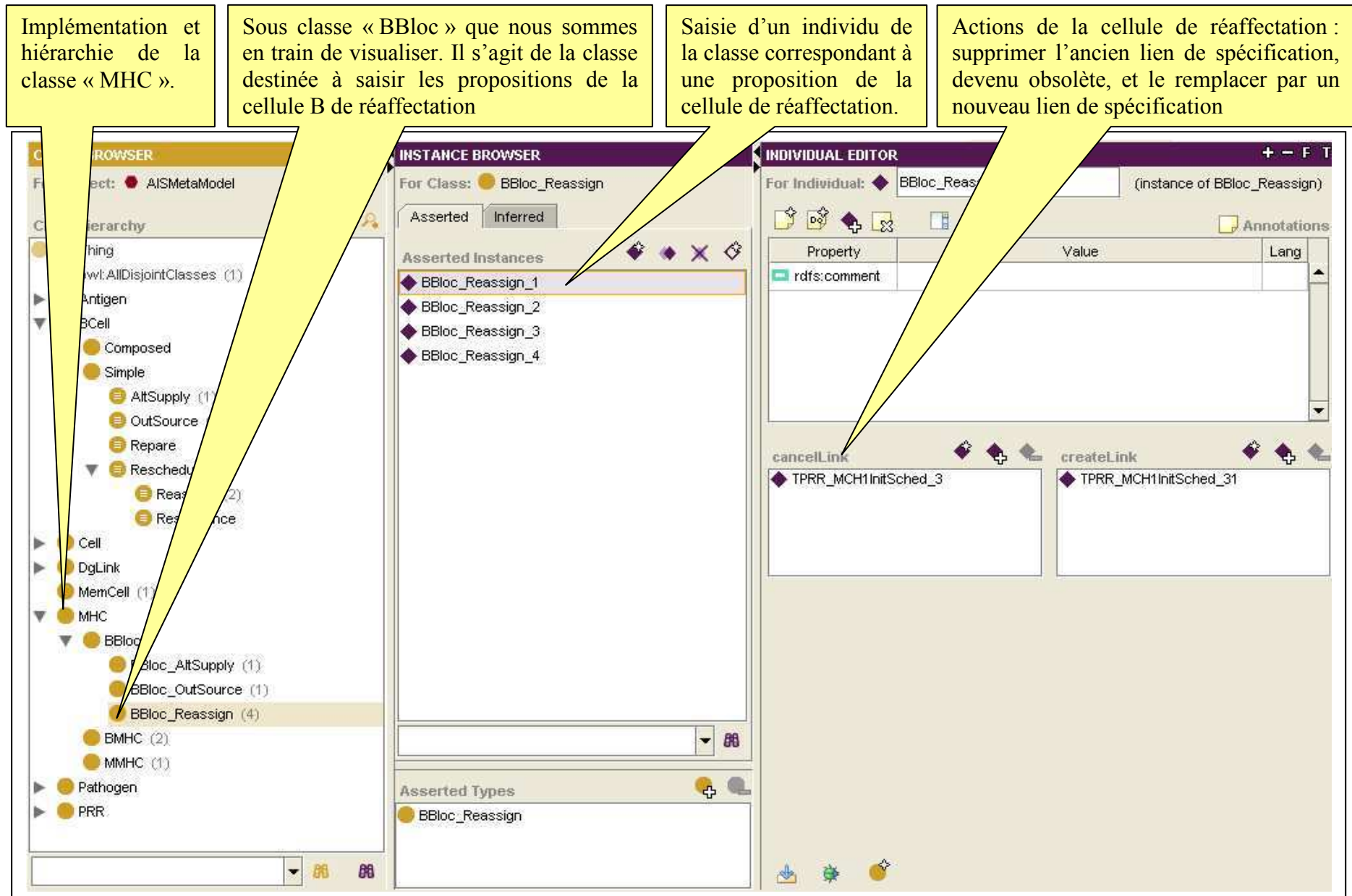


Figure 4.28: Illustration du détail de la proposition d'une cellule B de réaffectation.

4.6.7.4. Détermination de la compétence des cellules B composées

En plus de la stimulation par les antigènes et/ou les signaux de danger, nous avons déjà vu qu'une cellule B composée doit être stimulée par les propositions des cellules B simples, afin d'être activée.

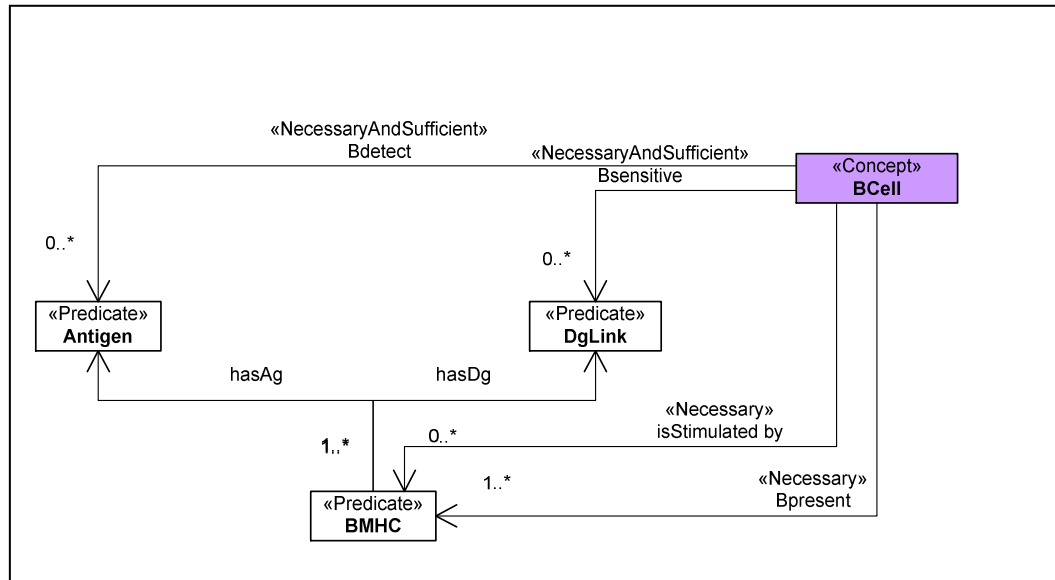


Figure 4.29: Détermination de la compétence des cellules B composées.

Ce principe est modélisé sur la Figure 4.29 par la restriction nécessaire sur la relation « *isStimulatedBy* » liant une cellule B composée aux individus de la classe « *BMHC* » qui composent son action.

La Figure 4.30 illustre la mise en œuvre de la cellule B composée permettant de subdiviser une opération, précédemment introduite par la figure 3.23 du chapitre précédent. On remarque que la relation « *BisStimulatedBy* » permet de saisir les cellules B simples de réaffectation et de reséquencement qui composent l'action de la cellule. La proposition de la cellule est quant à elle proprement saisie dans la relation « *Bpresent* ».

La Figure 4.31 illustre plus en détail la proposition de la cellule B composée de subdivision d'une opération. Plus particulièrement, la relation « *BMHC_hasBBloc* » permet de saisir les propositions qui composent et forment l'action de la cellule. Il s'agit d'une action de reséquencement et d'une action de réaffectation vers une ressource équivalente.

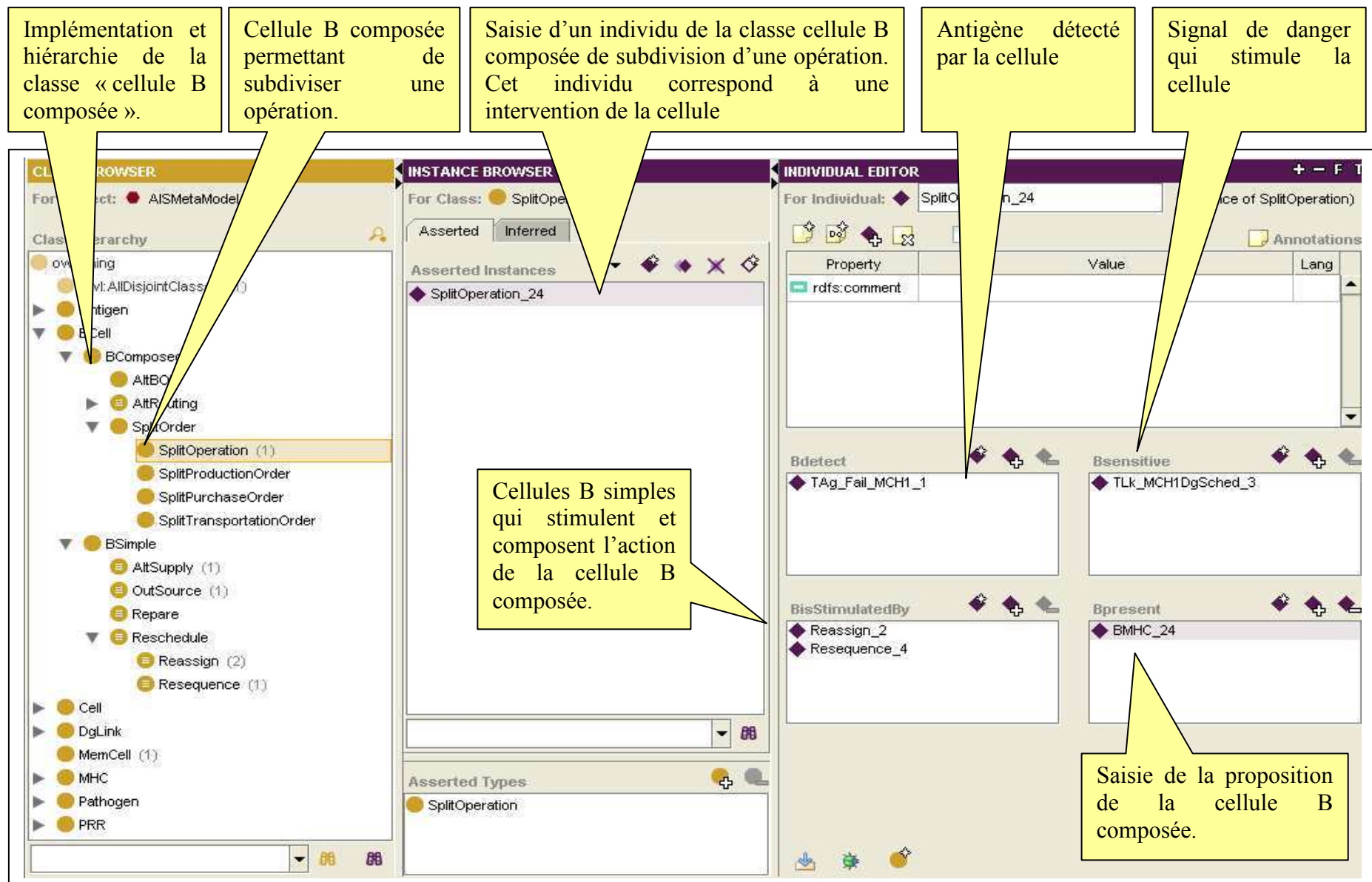


Figure 4.30: Illustration de la mise en œuvre d'une cellule B composée de subdivision d'une opération.

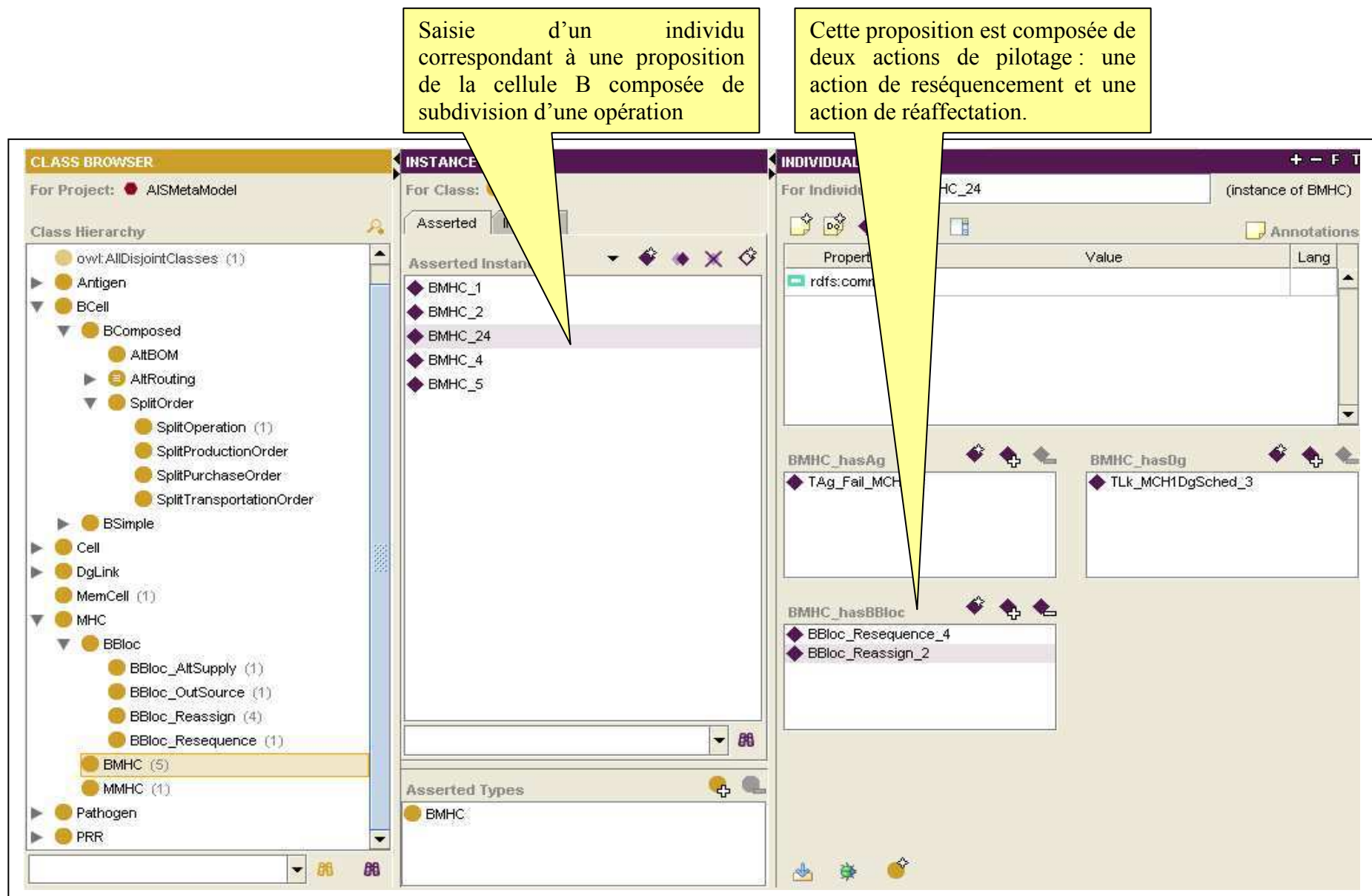


Figure 4.31: Illustration du détail de la proposition d'une cellule B composée de subdivision d'une opération.

4.6.7.5. Cellules mémoires

Une cellule mémoire permet de mémoriser les antigènes, les signaux de danger et les propositions des cellules B formant une réponse immunitaire. Le diagramme de classe UML de la Figure 4.32 permet de modéliser la mise en œuvre d'une cellule mémoire dans l'ontologie.

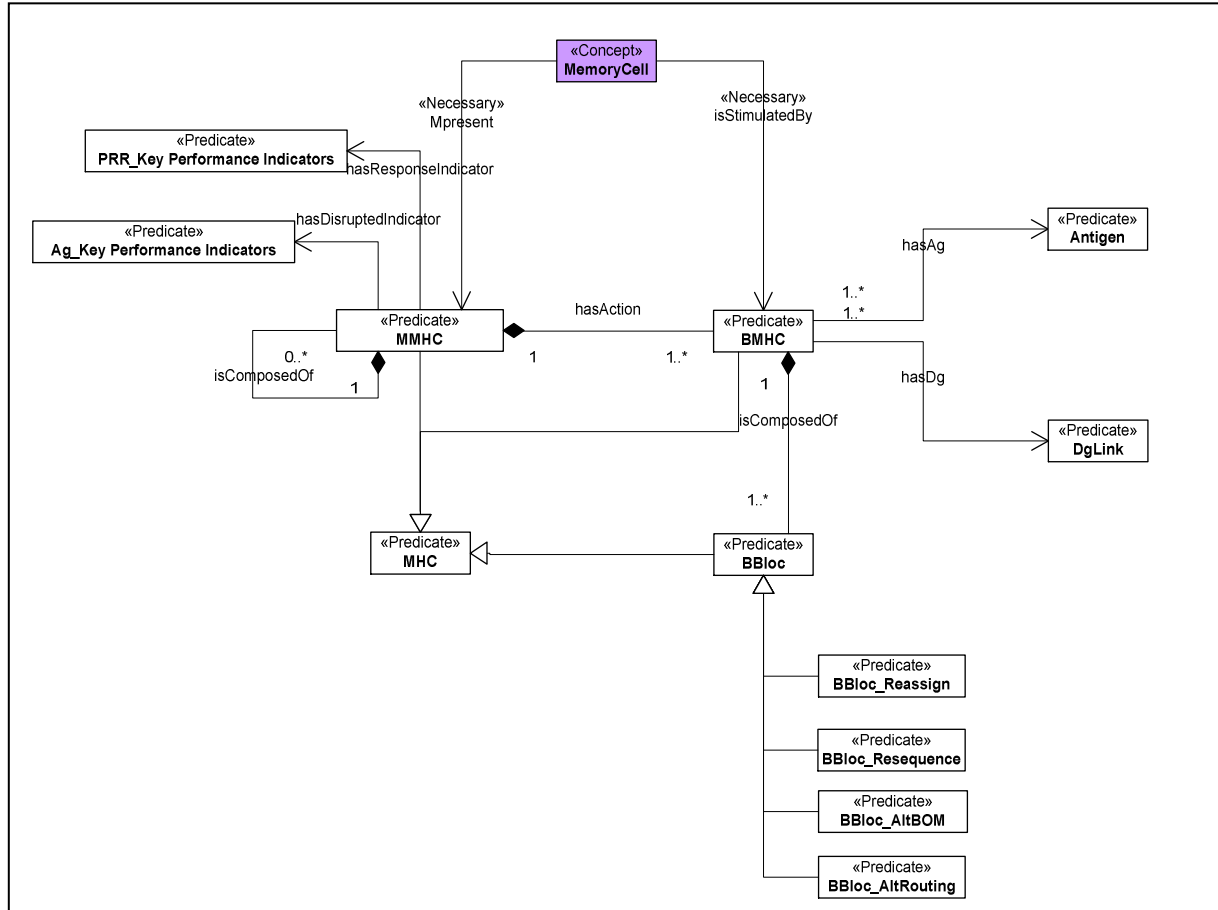


Figure 4.32: Mise en œuvre du concept de cellule mémoire.

Tout comme une cellule B, la compétence d'une cellule mémoire est définie par des attributs nécessaires et suffisants qui précisent les antigènes que la cellule peut détecter et les signaux de danger auxquels la cellule est sensible. Toutefois, pour être activée, une cellule mémoire a en plus besoin d'être stimulée par les propositions des cellules B qui interviennent dans la réponse. La relation nécessaire et suffisante « *isStimulatedBy* » permet de relier une cellule mémoire à un individu de la classe « *BMHC* » définissant ainsi les antigènes, les signaux de danger et les propositions des cellules B qui stimulent la cellule mémoire.

Une cellule mémoire activée fait des propositions aux cellules Th. Ces propositions sont mémorisées en tant qu'individus de la classe « *MMHC* ».

Lorsqu'une réponse immunitaire est sélectionnée pour réagir à la perturbation, l'agent cellule Th associé stocke cette réponse dans l'ontologie en tant que cellule mémoire. Comme la réponse est constituée de propositions de cellules B et mémoire, ceci justifie la relation de composition « *isComposedOf* » des individus de la classe « *MMHC* ». L'agent cellule Th

mémorise aussi les valeurs des indicateurs de performance correspondant à la situation perturbée en tant qu'individu de la classe (« *Ag_Key Performance Indicators* ») moyennant la relation (« *hasDisruptedIndicator* ») et après la réaction à la perturbation en tant qu'individu de la classe (« *PRR_Key Performance Indicators* ») moyennant la relation (« *hasResponseIndicator* »).

4.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la mise en pratique des propositions qui découlent de l'étude de l'immunité biologique. Nous avons conduit cette mise en pratique en deux étapes.

Dans la première étape, nous avons souligné la compatibilité entre ces propositions et le paradigme des systèmes multi agents. En effet, les propositions de l'immunité biologique ne sont pas en concurrence avec les approches multi agents de la littérature. Au contraire, ces propositions complètent et enrichissent les approches existantes. Cette compatibilité nous a permis d'entamer une approche d'ingénierie multi agents qui nous a conduit à spécifier un système immunitaire artificiel pour le pilotage de systèmes de production soumis à des perturbations, que nous avons baptisé ARTIMOS (« *ARTificial Immune Monitoring System* »). Nous avons présenté les agents du système, nous avons décrit leurs responsabilités et leurs interactions, et nous avons proposé un modèle de comportement générique pour chaque type d'agent.

Ce système offre des possibilités d'interaction avec les décideurs et les systèmes d'information de l'entreprise. Les décideurs alimentent le système avec leur expertise, peuvent simuler des scénarios de perturbations et répondre à des questions du type « *qu'est ce qui se passe si tel évènement se produit ?* », peuvent intervenir pour guider et orienter les décisions prises et disposent de facilités pour maintenir le système.

D'autre part, les systèmes d'information alimentent ARTIMOS avec les données techniques, les spécifications et l'état actualisé du système de production, et récupèrent en retour le résultat des décisions élaborées par le système en interaction avec les décideurs.

Le système ARTIMOS permet en outre de réaliser des fonctions essentielles à la gestion des perturbations, telles que les fonctions de détection des perturbations, d'identification des conséquences directes, indirectes et probables et de réaction aux perturbations. Ces fonctions sont distribuées sur les agents du système. Elles reposent sur un ensemble réduit de concepts génériques – issus de l'immunité biologique – qui permettent néanmoins de prendre en compte une grande variété de perturbations.

Dans la deuxième étape, nous nous sommes plus particulièrement concentrés sur la structuration et l'organisation des connaissances relatives aux perturbations. Cette étape représente la principale contribution de nos travaux. Nous avons proposé un modèle de connaissances basé sur une ontologie et destiné à mémoriser les perturbations, leurs conséquences ainsi que les actions ayant permis d'y réagir.

Ce modèle permet d'atteindre trois objectifs. D'abord il sert à formaliser la communication entre les agents du système. Ensuite, il représente une base de connaissances qui permet à chaque agent d'interpréter les stimuli de son environnement et de s'acquitter de ses responsabilités. Enfin, il permet d'acquérir des connaissances lors du traitement de

perturbations afin de les réutiliser lorsque d'autres perturbations similaires ou identiques ont lieu.

Dans le prochain chapitre, nous prenons quelques exemples de perturbations et nous illustrons comment le système développé permet de les prendre en compte.

Chapitre 5 : Exemples de pilotage par les principes immunitaires

RÉSUMÉ. L'étude des principes immunitaires biologiques et leur adaptation au contexte du pilotage de systèmes de production nous ont conduits à la spécification d'un système immunitaire artificiel pour le pilotage et au développement d'un modèle de connaissances pour gérer les perturbations. Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'illustration du fonctionnement du système et à l'utilisation de ce modèle de connaissances. Pour ce faire, nous prenons deux exemples de perturbations, respectivement une défaillance d'approvisionnement et une défaillance d'une ressource de production. Pour chaque exemple, nous illustrons les fonctions de détection de la perturbation, d'identification de ses conséquences, d'activation d'actions de pilotage et de réaction à la perturbation et à ses conséquences. Enfin, nous concluons par l'analyse non seulement des apports et de la généralité de l'approche mais aussi de ses limitations. Cette analyse montre que l'approche est suffisamment générique pour permettre de prendre en compte une variété de types de perturbations, et pour intégrer une variété d'outils, d'algorithmes et de décisions de pilotages permettant de réagir à ces perturbations. Par contre, les procédures de vérification de l'impact et des conséquences des perturbations sur les entités du système de production, le seuil à partir duquel ces entités sont en danger, les procédures d'évaluation des conséquences résiduelles après réaction et enfin les algorithmes de réponse eux-mêmes sont spécifiques au système de production considéré.

5.1. Introduction

L'étude de l'immunité biologique nous a permis de mettre en valeur des principes immunitaires pertinents pour le pilotage de systèmes de production en environnement perturbé. Nous avons traduit ces principes en une spécification d'une application logicielle basée sur le paradigme des systèmes multi agents. Nous avons identifié les agents, leurs responsabilités, et les interactions entre eux, et nous avons développé un modèle de connaissances permettant de gérer les perturbations.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'illustration du fonctionnement du système et à l'utilisation de ce modèle de connaissances. Le but est de montrer que les principes immunitaires peuvent améliorer les capacités des systèmes MES existants à prendre en compte des événements divers et variés issus du système de production et à les interpréter comme sources de perturbations possibles dont les conséquences peuvent être identifiées et traitées. Les perturbations, leurs conséquences ainsi que les réponses ayant permis d'y réagir peuvent être mémorisées en vue d'une réutilisation future.

Pour ce faire, nous commençons par décrire le système de production pris comme exemple, puis nous donnons un aperçu de la maquette informatique développée. Ensuite, nous nous plaçons du point de vue de l'ontologie afin de montrer comment la base de connaissances développée peut jouer un rôle de support d'information, de communication et de travail pour les différents agents cellules.

Nous prenons deux exemples de perturbations, respectivement un exemple de problèmes liés aux fournisseurs, et un exemple de problèmes liés aux ressources. Pour chaque exemple, nous illustrons les fonctions de détection de la perturbation, d'identification de ses conséquences, d'activation d'actions de pilotage et enfin, d'aide à l'élaboration d'une réaction à la perturbation et à ses conséquences. Nous concluons en discutant les apports et les limitations de l'approche proposée.

5.2. Description du système de production

Considérons le système de production d'une entreprise manufacturière de taille moyenne, opérant dans le domaine de l'industrie mécanique (usinage et montage de pièces mécaniques). Cette entreprise s'approvisionne auprès de fournisseurs de matières premières et peut sous traiter certaines de ses opérations de production. La production est déclenchée à la commande : chaque client lance une commande sur un ou plusieurs produits, tout en spécifiant pour chaque produit les quantités et les dates d'échéance.

Le paysage des systèmes d'information de l'entreprise comporte un système ERP et un système MES. Ce dernier permet de suivre le déroulement des activités de production en assurant la collecte et l'acquisition de données à partir de capteurs et de données saisies par les opérateurs. Il intègre notamment un module de gestion de la maintenance GMAO et un module de gestion de la qualité GQAO.

Le système ERP permet de gérer entre autres les approvisionnements, la production, et l'activité commerciale de l'entreprise. Les approvisionnements sont gérés en éditant des ordres d'achat et de transport, et en maintenant une liste de fournisseurs, de sous traitants et

de transporteurs qui mentionne notamment le délai d'approvisionnement de chaque prestataire.

Les commandes des clients sont saisies au niveau du module commercial de l'ERP. Ces commandes sont ensuite transformées par la gestion de la production en ordres de fabrication (OF) émis vers l'atelier de production. Outre les informations sur le client, le produit, la quantité à fabriquer et la date d'échéance, un ordre de fabrication comporte la gamme opératoire et la nomenclature de fabrication par défaut du produit commandé. Le module de gestion de production maintient notamment une liste de gammes opératoires de substitution et une liste de nomenclatures de substitution pour chaque article fabriqué.

L'atelier de production est géré par des décideurs dont un responsable de la maintenance, un responsable de la qualité, et un chef d'atelier.

Le responsable de la maintenance veille sur la disponibilité des ressources de production, notamment en récupérant les demandes de maintenance corrective et en planifiant les interventions de maintenance corrective et préventive. Il est particulièrement responsable de l'estimation des durées des interventions de maintenance et des dates de remise à disposition des ressources défaillantes. Il est aidé dans son travail par le module GMAO du système MES qui permet notamment d'éditer des ordres de maintenance.

Le responsable qualité veille sur le respect des critères et des normes de qualité des produits et des processus. Il est particulièrement responsable de l'édition et du maintien de procédures et d'instructions de travail spécifiant entre autres les critères de sélection et de performance des fournisseurs, les instructions de réglage, de démarrage et de conduite des machines, ainsi que les critères de qualité des produits achetés et fabriqués. Il est aidé dans son travail par le module GQAO du système MES qui permet notamment d'éditer des ordres de contrôle qualité lorsque des produits non-conformes sont détectés.

Le chef d'atelier assure la coordination et la cohérence des activités de production et est particulièrement responsable de l'affectation définitive des activités aux ressources. Il intervient pour résoudre des conflits et trouver des compromis entre les différents services de production, maintenance et qualité.

L'atelier de production est un atelier semi automatisé qui comporte entre autres 3 machines outils M1, M2 et M3. Les machines M2 et M3 sont équivalentes. Les opérations effectuées sur ces deux machines peuvent être remplacées par des opérations manuelles équivalentes. Pour chaque produit fabriqué, des gammes opératoires multiples peuvent exister.

Pour fonctionner correctement, les machines de l'atelier nécessitent le réglage de certains paramètres tels que la température et la pression. Ces paramètres sont spécifiés dans des instructions qualité pour chaque article fabriqué. Ils doivent être réglés puis surveillés durant l'exécution des opérations sur les machines. Pour ce faire, des capteurs fixés sur les machines acquièrent les valeurs de ces paramètres et les stockent dans le système MES.

Ce système de production peut subir différents types de perturbations, comme par exemple des défaillances des fournisseurs, et des défaillances des ressources de production. Dans ce contexte, un système immunitaire artificiel permet de piloter les activités de ce système de production contre les perturbations. Afin d'illustrer le fonctionnement d'un tel système, considérons les activités d'approvisionnement, de transport et de production, matérialisées par

des ordres dont le déroulement dans le temps est organisé comme le montre le diagramme Gantt de la **Figure 5.1**.

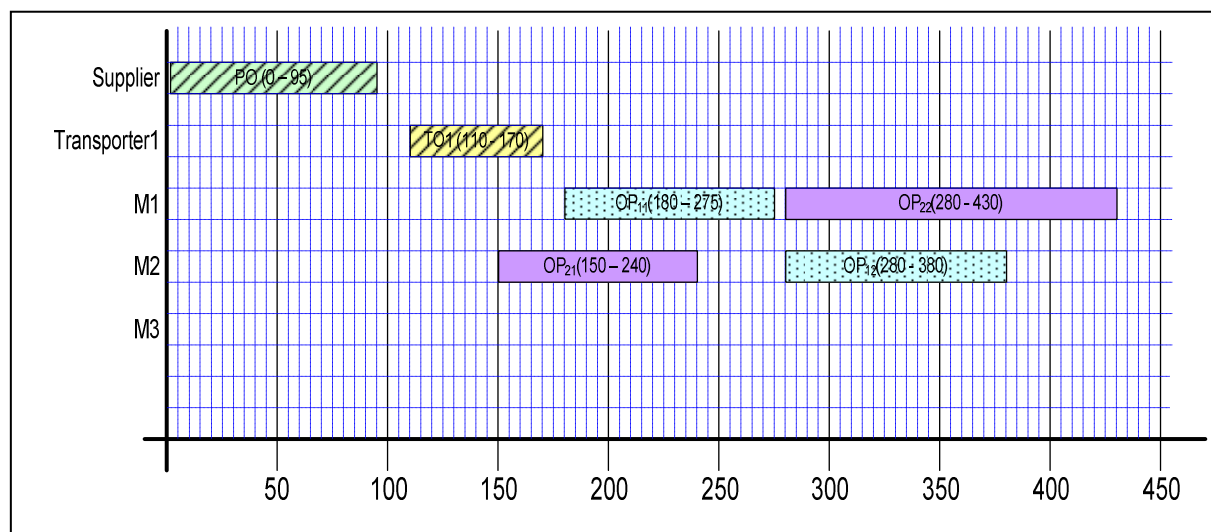


Figure 5.1: Diagramme GANTT de quelques activités de production à piloter.

Le **Tableau 5.1** donne une description plus détaillée de ces activités. Précisons que les activités d'approvisionnement (ordre d'achat PO1) et de transport (ordre de transport TO1) portent sur une matière première MP1 nécessaire pour la production du produit P1. Le produit P2 ne requiert pas cette matière. Une date d'émission et une date d'échéance sont associées à chaque ordre de fabrication. La date d'émission précise la date de libération de l'ordre de fabrication vers l'atelier. La date d'échéance précise la date de livraison promise au client.

Tableau 5.1: Description des activités de production de la **Figure 5.1.**

Activité	Description	Date de début	Date de fin
PO	Approvisionnement d'une matière première MP1	0	95
TO1	Transport de l'article approvisionné	110	170
OP11	Première opération de production d'un article P1 sur la machine M1	180	275
OP12	Deuxième opération de production d'un article P1 sur la machine M2	280	380
OP21	Première opération de production d'un article P2 sur la machine M2	150	240
OP22	Deuxième opération de production d'un article P2 sur la machine M1	280	430
WO(P1)	Ordre de fabrication du produit P1	150 (date d'émission)	400 (date d'échéance)
WO(P2)	Ordre de fabrication du produit P2	150 (date d'émission)	450 (date d'échéance)

5.3. Présentation de la maquette informatique

Afin de mettre cet exemple en œuvre, nous avons développé une maquette informatique intégrant une base de données pour simuler les systèmes ERP et MES, un système multi agents dont les agents implémentent les cellules du système immunitaire artificiel, et une ontologie destinée à capitaliser les connaissances sur les perturbations.

Nous avons développé la base de données en utilisant le logiciel Microsoft Access. Cette base centralise des informations minimales sur les clients, les fournisseurs, les sous traitants, les articles achetés, sous traités et fabriqués, les gammes opératoires et les nomenclatures. Elle est raisonnablement développée pour permettre d'éditer des ordres d'achat, de transport, de fabrication, de maintenance et de contrôle qualité, et saisir des plannings de production détaillant le déroulement dans le temps de ces différentes activités. Cette base contient enfin des tables permettant de simuler le suivi des activités, plus particulièrement l'enregistrement des mesures des capteurs pour surveiller les paramètres des machines et déclarer les quantités produites.

Nous avons utilisé la plateforme JADE (Nikraz *et al.*, 2006) pour implémenter les cellules du système immunitaire artificiel sous forme d'agents. Parmi les agents du système, l'agent « organisme » se charge d'initialiser et de lancer les autres agents du système comme il sera développé dans la [section 5.3.2](#) suivante. Nous avons spécialisé une cellule APC pour la détection des défaillances des fournisseurs, et une cellule APC pour la détection des défaillances des ressources. Nous avons aussi spécialisé différentes cellules B qui seront introduites dans les [sections 5.4.3](#) et [5.5.3](#) correspondant à l'activation d'actions de pilotage. Enfin, nous avons développé un agent cellule Th destiné à interagir avec le chef d'atelier pour construire une réponse immunitaire cohérente et la stocker en tant que cellule mémoire dans l'ontologie.

Pour les besoins de l'exemple, nous avons associé un agent cellule à chaque machine, opération, gamme opératoire et ordre de fabrication. La [Figure 5.2](#) illustre la manière avec laquelle nous avons implémenté ces agents.

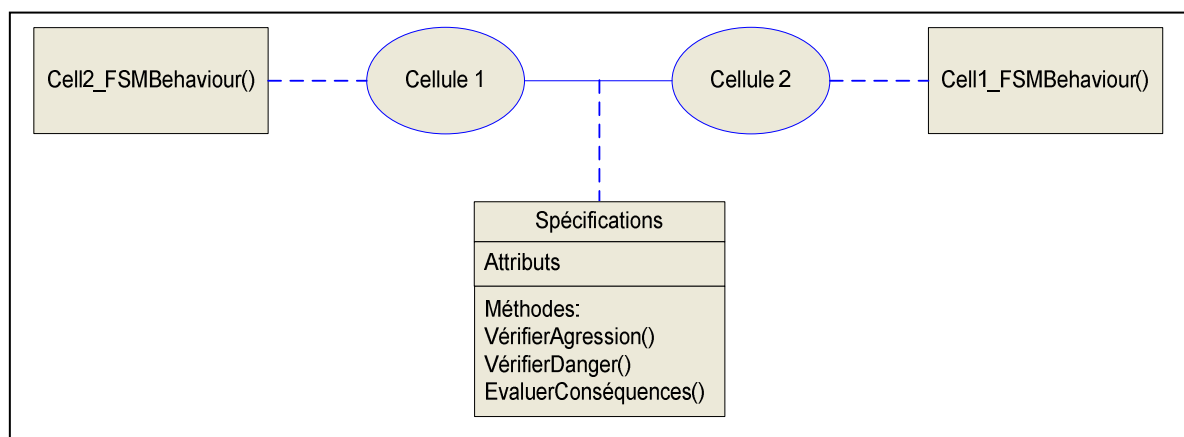


Figure 5.2: Implémentation des agents cellules du système immunitaire artificiel.

Nous avons associé à chaque type d'agent une machine à états finis (« *FSMBehaviour* ») qui implémente son modèle comportemental. Les concepts d'héritage et de polymorphisme du paradigme orienté objet permettent de faciliter grandement le travail de conception, de développement et de spécialisation des modèles comportementaux des agents. En effet, les agents correspondants aux cellules d'un même type héritent tous du même modèle comportemental. Ensuite, grâce au polymorphisme, on peut personnaliser le comportement de chaque agent au sein de son type en fonction des responsabilités dont il doit s'acquitter.

Enfin, comme il a été mentionné dans le chapitre précédent, nous utilisons le logiciel Protégé [Protégé, 2000] pour développer l'ontologie destinée à capitaliser les connaissances sur les perturbations et à gérer les messages échangés entre les agents cellules du système.

L'ontologie permet un double usage. D'abord, comme il a été détaillé dans le chapitre précédent, elle est utilisée comme base de connaissances pour stocker les instances, les attributs et les conséquences de perturbations, mais aussi les actions de pilotage et les réponses ayant permis d'y réagir.

D'un autre côté, la structure de l'ontologie est reprise en tant que classes au niveau des agents du système immunitaire artificiel. Ces classes permettent de structurer les messages et les communications entre les agents cellules du système. Plus particulièrement, s'agissant des liens de spécification des cellules, les classes de l'ontologie permettent en plus de définir et d'implémenter des méthodes spécifiques comme l'illustre la Figure 5.2. Ces méthodes spécifiques permettent de :

- vérifier si un lien est agressé par un antigène,
- vérifier si un lien est mis en danger par des signaux de danger,
- évaluer les conséquences résiduelles après réponse

5.3.1. Définition des spécifications des activités

Dans la description de l'exemple, nous avons vu que pour fonctionner correctement, les machines de l'atelier nécessitent le réglage de certains paramètres tels que la température et la pression. Ces paramètres peuvent être considérés comme des spécifications qualité que la classe « *PRR* » et ses sous classes permettent de gérer.

La Figure 5.3 décrit la capture des spécifications qualité qui précisent les réglages des paramètres de température et de pression de la machine (M1). Ces réglages sont nécessaires pour exécuter la première opération (O11) de production de l'article (P1).

Les valeurs nominales des paramètres sont renseignées dans la catégorie spécifications qualité (« *QualityPRR* »), sous la rubrique ressource (« *Resource* »). Dans ce cas, une instance de la classe « *Température* » et une instance de la classe « *Pression* » sont créées pour la machine en question.

Cette étape permet d'illustrer que la classe « *PRR* » de l'ontologie peut être mise en correspondance avec les exigences de qualité du système de production. Cette classe permet en effet de renseigner les valeurs nominales ou conventionnelles de paramètres, d'indicateurs, etc.

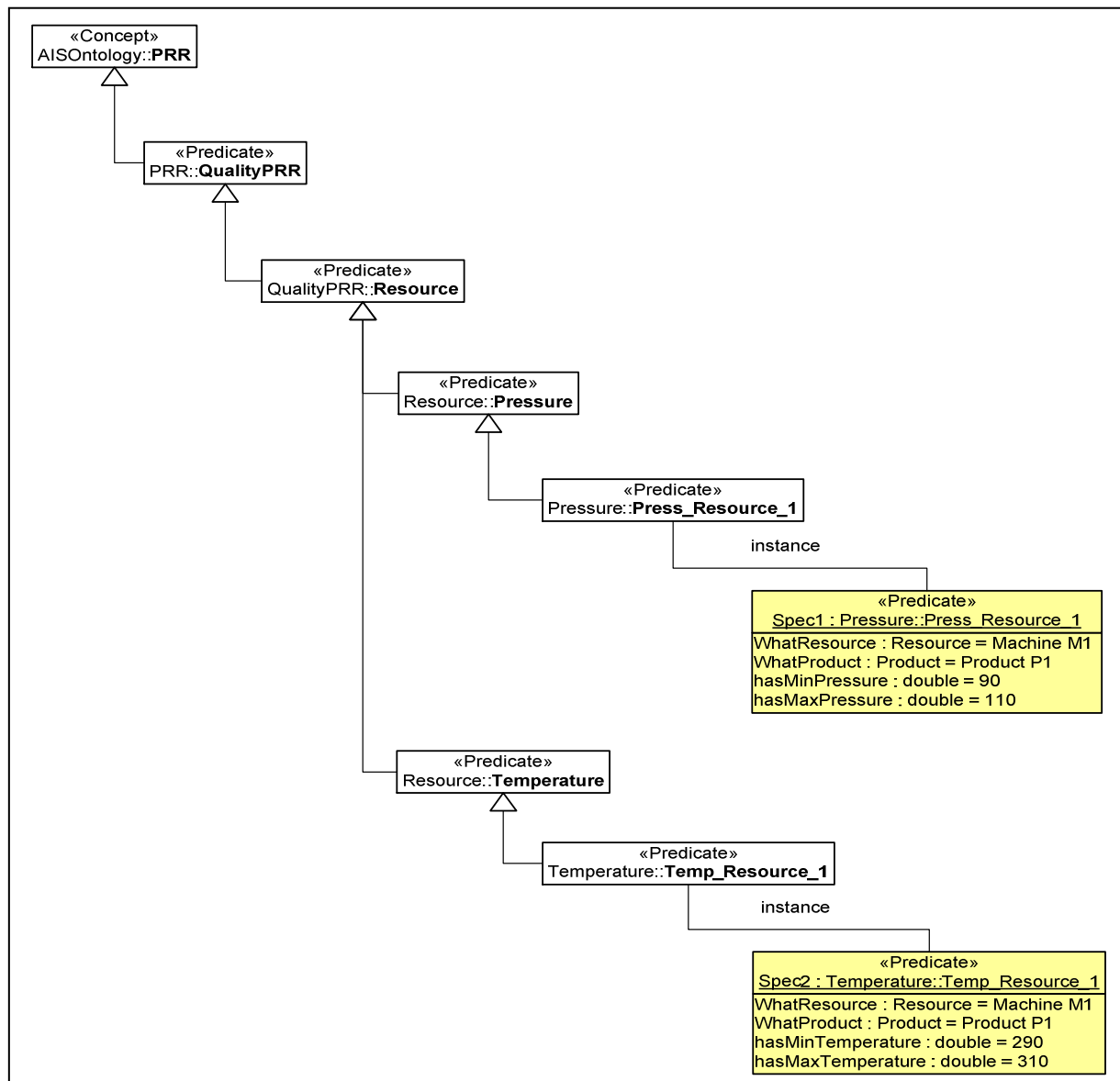


Figure 5.3: Renseignement de quelques spécifications qualité.

5.3.2. Définition d'un tissu de cellules artificielles

Dans cette étape, il s'agit d'associer un agent cellule à chacune des entités et activités à piloter contre les perturbations et de décrire chaque cellule en lui précisant ses spécifications. L'agent organisme est en charge de consulter les systèmes d'information de l'entreprise (Dans notre maquette, il s'agit de la base de données qui simule les systèmes ERP et MES) afin de détecter le lancement de nouveaux ordres associés à des activités, tels que des ordres d'achat, des ordres de production, des ordres de maintenance, des ordres de contrôle qualité, etc. L'agent organisme associe un agent cellule à chacun de ces ordres et le lance parmi les cellules du système immunitaire artificiel.

La Figure 5.4 illustre la cellule associée à l'ordre d'achat (PO1). Cette cellule est définie par des spécifications de temps, de coût et de qualité. Les spécifications de temps précisent la durée nominale d'approvisionnement du fournisseur ainsi que des données sur

l'ordonnancement de cet ordre d'achat (quantité de l'ordre, date d'émission et de fin de l'ordre et ordres liés dans la planification). La spécification de coût précise le prix nominal d'achat de l'article. Ces spécifications de temps et de coûts proviennent du système ERP. Enfin, les spécifications de qualité précisent les exigences de qualité que l'article acheté doit satisfaire. Ces spécifications proviennent du système GQAO de gestion de la qualité.

La [figure A.1](#) de l'annexe présente la cellule associée à l'ordre de transport (TO1). Cette cellule est définie par des spécifications de temps et de coût. Ces spécifications proviennent du système ERP. Les spécifications de temps précisent la durée nominale de transport du transporteur ainsi que des données sur l'ordonnancement de l'ordre (date d'émission et de fin de l'ordre et ordres liés dans la planification). La spécification de coût précise le prix nominal de transport de l'article.

Les [figures A.2 et A.3](#) de l'annexe présentent les cellules associées aux opérations (O11, O12, O21, et O22) des ordres de fabrication des produits P1 et P2. Ces cellules sont définies par des spécifications de temps et de qualité. La spécification de temps qui précise la cadence nominale de production provient du système ERP. Les spécifications de temps qui précisent les données d'ordonnancement initial des opérations (date de début, date de fin, opérations précédente et suivante dans la gamme du produit et sur la même ressource) proviennent du système MES. Les spécifications de qualité proviennent du système GQAO. Elles précisent les critères de qualité de l'opération, c'est-à-dire les paramètres de réglage que la ressource doit satisfaire pour bien réaliser l'opération.

En ce qui concerne les spécifications portées par les liens de qualité, on peut préciser que le lien de qualité qui lie une opération à une ressource porte les paramètres de réglage que cette ressource doit respecter afin de satisfaire les exigences de qualité de l'opération. Le lien de qualité qui lie une gamme à une opération renseigne les exigences qualité que l'article doit satisfaire à l'issue de l'opération. Enfin, le lien de qualité qui lie un ordre de fabrication à une gamme renseigne les exigences qualité que l'article semi fini ou fini doit satisfaire à l'issue de l'ordre.

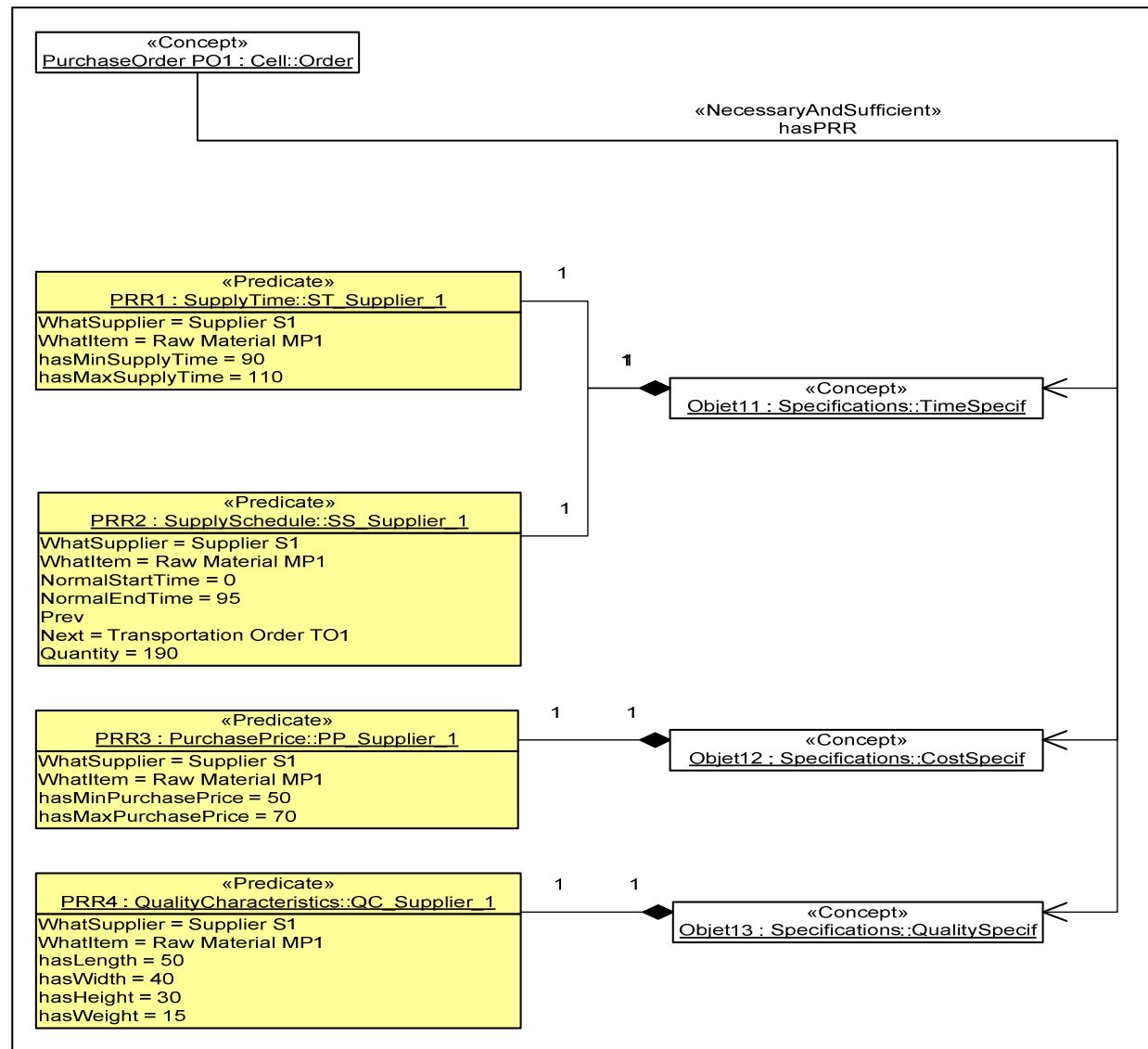


Figure 5.4: Illustration des spécifications de la cellule ordre d'achat.

5.4. Exemple 1 : défaillance d'approvisionnement

Dans cet exemple, nous illustrons comment il est possible de prendre en compte et de gérer une perturbation du type défaillance d'approvisionnement.

5.4.1. Détection de la perturbation

Pour détecter la perturbation, deux scénarios sont envisageables :

1^{er} scénario : à la date $t = 50$ par exemple, le chef d'atelier est averti que le fournisseur va livrer en retard de 25 unités de temps. Dans ce scénario, la perturbation est dite « planifiée » dans le sens où le chef d'atelier est conscient et n'est pas pris de court par l'occurrence de la perturbation. Dans ce cas, le chef d'atelier peut introduire la perturbation dans le système sous forme d'un pathogène dont l'antigène porte sur la modification de la planification initiale, comme le montre la [Figure 5.5](#).

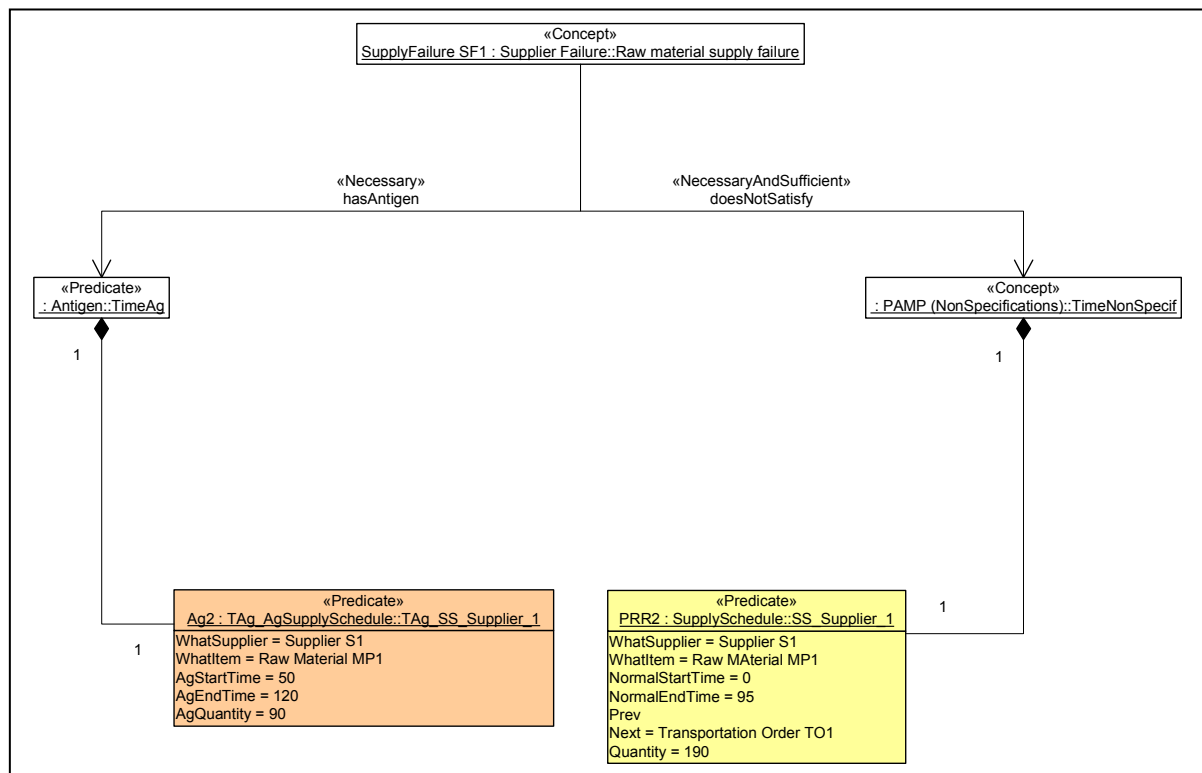


Figure 5.5: Illustration du pathogène introduit suite à la déclaration d'une perturbation « planifiée » de type « retard du fournisseur ».

La date de début portée par l'antigène correspond à la date où la perturbation a été annoncée par le fournisseur. La date de fin portée par l'antigène correspond à la date de fin de la perturbation annoncée par le fournisseur. La quantité portée par l'antigène correspond à la quantité qui reste encore à produire au moment où le fournisseur annonce la perturbation.

2^e scénario : à la date de mise à disposition initialement prévue ($t = 95$), la livraison n'est pas effectuée. Le chef d'atelier est surpris par l'occurrence de la perturbation, qui a lieu sans préavis préalable de la part du fournisseur. Dans ce scénario, la perturbation est imprévisible dans le sens où le chef d'atelier n'est pas capable d'anticiper son occurrence.

Dans ce cas, c'est la supervision de la spécification du délai d'approvisionnement qui permet de détecter la perturbation.

En effet, cette spécification stipule que le délai d'approvisionnement de ce fournisseur pour cet article est compris entre 90 et 110 unités de temps (cf. Specif1 de la Figure 5.4). A la date $t = 95$, lorsque l'ordre d'achat n'a pas été réceptionné, la cellule APC en charge de la détection des défaillances des fournisseurs tolère le retard du fournisseur dans la mesure où ce retard respecte la spécification du délai d'approvisionnement, et dans la mesure où l'ordonnancement initial le permet aussi (existence d'une marge entre l'ordre d'achat et l'ordre de transport dans la planification initiale).

Toutefois, lorsque la date $t = 110$ arrive (délai d'approvisionnement écoulé), et que l'ordre d'achat n'est pas encore soldé, la cellule APC (en charge des défaillances des fournisseurs) détecte un écart non tolérable dû à la violation de la spécification du délai d'approvisionnement. Cette violation permet de créer un pathogène « *retard fournisseur* » dont l'antigène est une estimation du retard de livraison ou de mise à disposition, comme l'illustre la Figure 5.6.

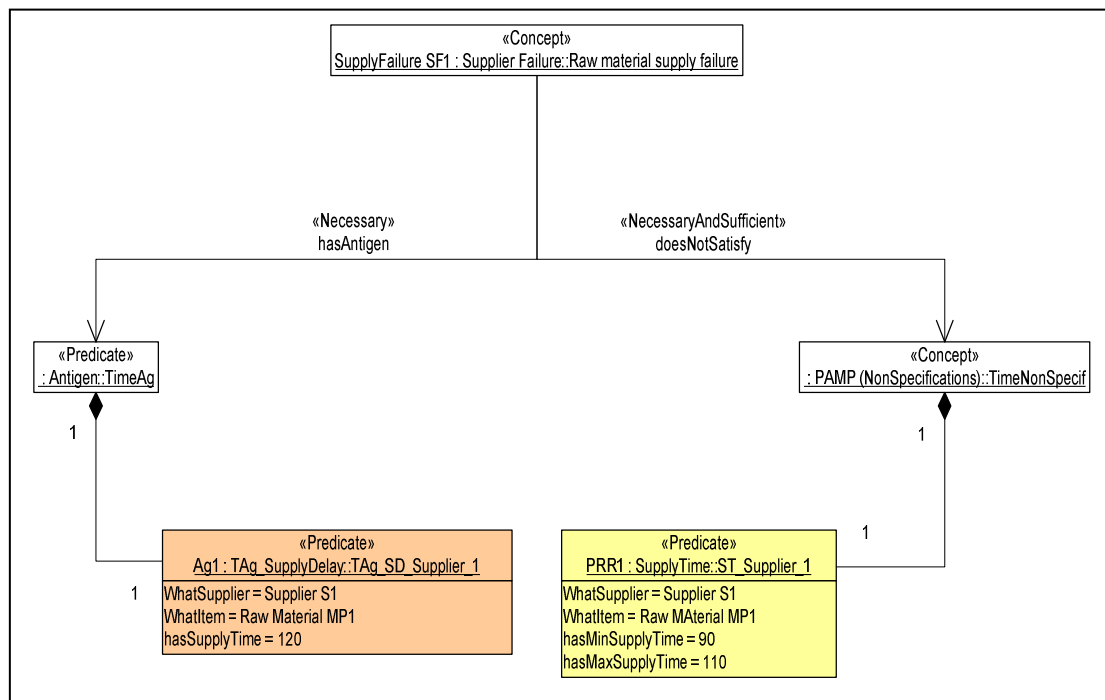


Figure 5.6: détection d'un retard fournisseur dans le cas d'une perturbation improvisée.

L'estimation du retard de livraison peut provenir des responsables du service approvisionnement ou bien en examinant l'historique du fournisseur.

Dans le cas où cette estimation vient des responsables du service approvisionnement, la cellule APC en charge des défaillances des fournisseurs interagit avec ces responsables pour les alerter de l'occurrence d'une perturbation, et solliciter leur intervention pour estimer la durée du retard.

L'ontologie elle-même peut aider à estimer ce retard puisqu'elle détient déjà un historique des défaillances des fournisseurs. En effet, puisque l'ontologie stocke les occurrences de

perturbations et les réponses associées, elle fournit un historique qui peut aider à prévoir le comportement des fournisseurs défaillants. Ceci illustre un des aspects du principe de mémoire immunitaire.

Bien que différents, ces deux scénarios aboutissent à la création d'un pathogène avec deux antigènes touchant les 2 spécifications de délai d'approvisionnement et d'ordonnancement/planification initiale, comme l'illustre la **Figure 5.7**. En fait, ces deux spécifications sont interdépendantes. C'est pour cette raison que toute perturbation qui affecte l'une affecte l'autre. Si le délai d'approvisionnement est dépassé, alors ceci se répercute sur la planification initiale. Et réciproquement, si la planification initiale est affectée, alors vraisemblablement, le délai d'approvisionnement sera remis en cause. Le pathogène muni des deux antigènes permet de refléter cette interdépendance.

De manière plus générale, les antigènes peuvent avoir des relations d'interdépendance entre eux. Un deuxième exemple consiste à dire qu'il est fort probable que le retard du fournisseur induise des coûts d'approvisionnement supplémentaires. Ces coûts supplémentaires peuvent être pris en compte en leur associant un antigène coûts qui porte une estimation du surcoût d'approvisionnement. Il est du ressort de la cellule APC de déterminer et de tenir compte de ces interdépendances.

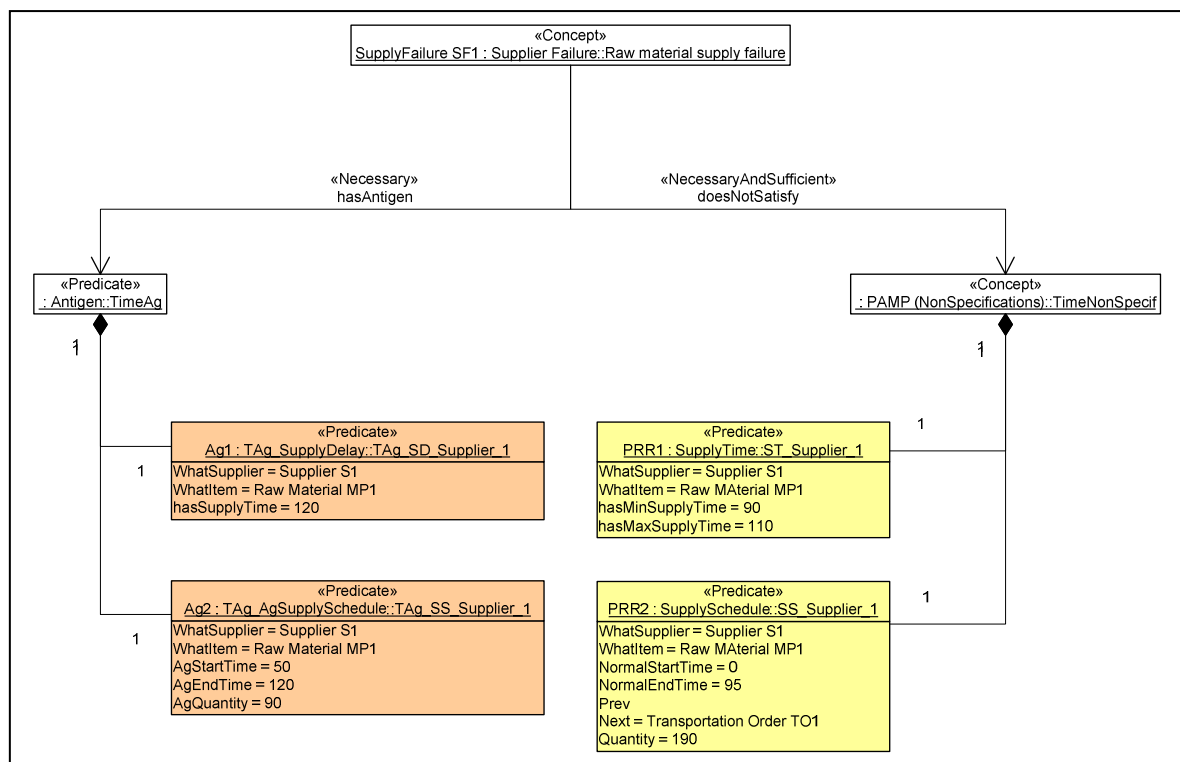


Figure 5.7: illustration du pathogène créé suite à la détection d'une perturbation de type retard fournisseur.

5.4.2. Identification des conséquences de la perturbation

Cette étape consiste à propager la perturbation détectée dans le système de production et à déterminer ses conséquences sur les activités pilotées.

Lorsque la cellule APC en charge des défaillances des fournisseurs introduit le pathogène de la [Figure 5.7](#) dans le système, ce dernier libère ses antigènes parmi les cellules du système. Chaque cellule perçoit ces antigènes et vérifie leur impact sur ses liens de spécification.

Dans la maquette que nous avons développée, nous avons doté chaque lien de spécification de méthodes spécifiques capables de déterminer si le lien est affecté par les antigènes ou les signaux de dangers que la cellule perçoit. La cellule crée un lien de danger correspondant à chaque lien de spécification agressé par un antigène puis diffuse un signal de danger pour alerter de cette agression.

La [Figure 5.8](#) présente un diagramme GANTT qui illustre le retard du fournisseur et le résultat de la propagation de cette perturbation dans le système. Dans cet exemple, les conséquences de cette perturbation se limitent aux seuls ordres d'achat PO1 et de transport TO1 car le planning initial contient des marges qui permettent d'absorber la perturbation.

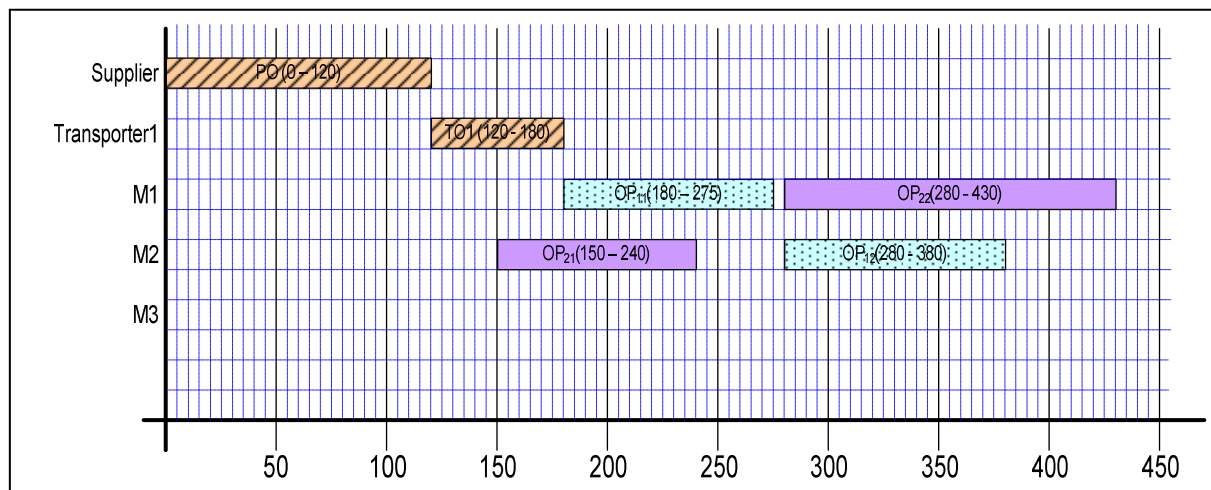


Figure 5.8: Diagramme GANTT des activités en présence d'une perturbation de type retard fournisseur.

Les [figures 9 et 10](#) permettent d'illustrer le résultat de la propagation des antigènes sur les cellules affectées.

En ce qui concerne l'ordre d'achat PO1, la cellule correspondante détermine qu'elle est concernée par les antigènes libérés par le pathogène et que ces antigènes l'agressent. La cellule détermine que ces antigènes affectent les liens de spécifications de délai d'approvisionnement et d'ordonnancement/planification initiale, comme l'illustre la [Figure 5.9](#).

Sur cette figure, deux liens de danger ont été créés pour refléter les spécifications agressées. Le lien de danger sur le délai d'approvisionnement comprend une estimation du délai d'approvisionnement. Le lien de danger sur l'ordonnancement reflète la propagation du retard d'approvisionnement. L'information sur les quantités disponible et manquante reflète le suivi de l'ordre d'achat et va permettre d'orienter la prise de décision.

La cellule PO1 détermine la nature des dangers subis, crée en conséquence des liens en danger et diffuse ces liens en danger en tant que signaux de danger. Ces signaux sont perçus

par les cellules environnantes, telles que la cellule correspondant à l'ordre de transport TO1 qui est liée par un lien de planification à l'ordre d'achat PO1.

En percevant les signaux de danger émis par la cellule ordre d'achat PO1, la cellule ordre de transport TO1 vérifie qu'elle est concernée par le signal de danger portant sur la modification de la planification initiale de l'ordre d'achat et que ce signal l'affecte. La cellule détermine que ce signal de danger affecte sa propre planification initiale, et crée en conséquence le lien de danger correspondant, comme l'illustre la [Figure 5.10](#).

Lorsque la cellule TO1 diffuse son signal de danger, les cellules environnantes correspondant aux ordres de fabrication et aux opérations ne perçoivent aucun danger, parce que le planning initial a absorbé la perturbation.

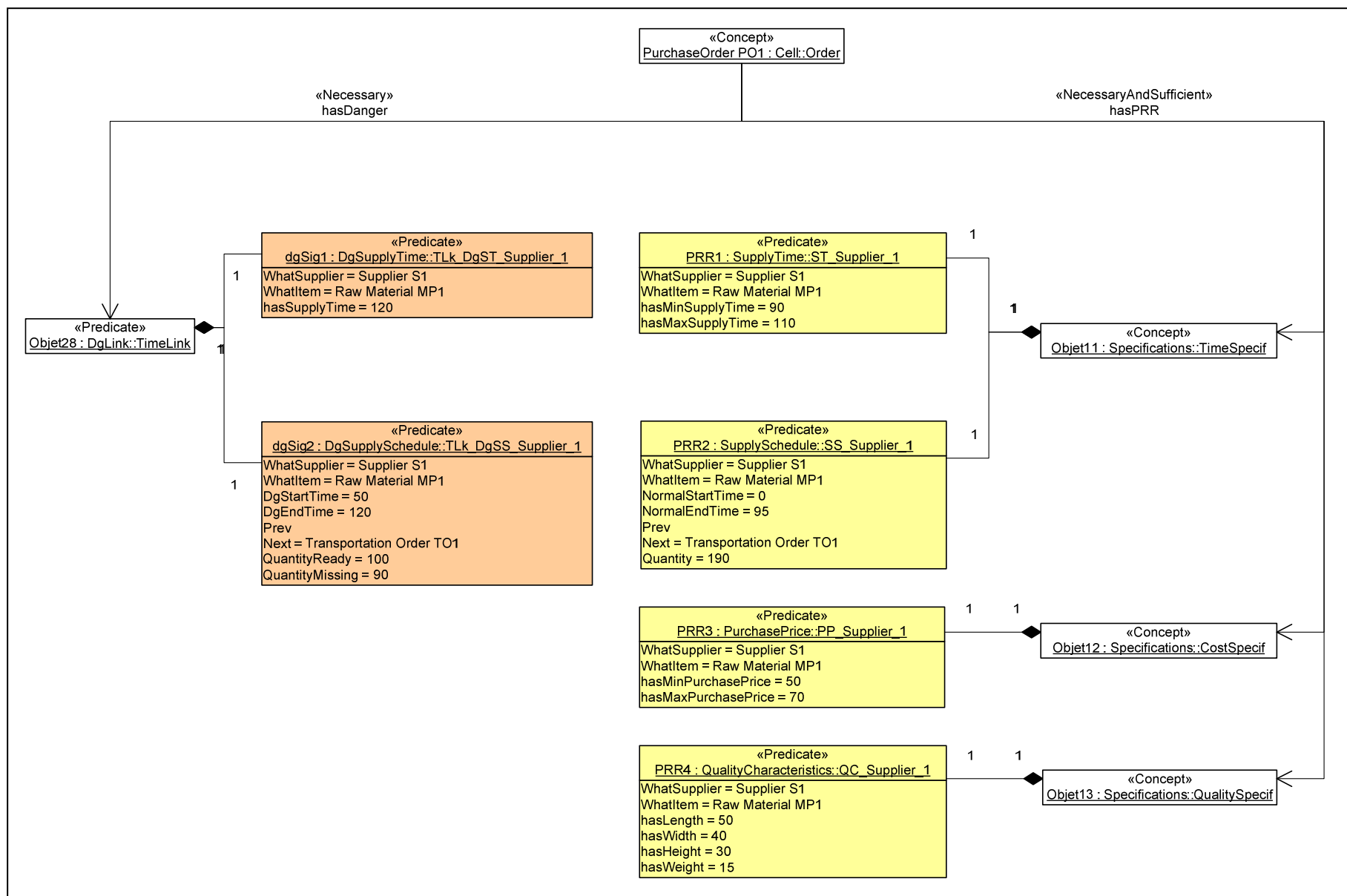


Figure 5.9: Illustration de la création de signaux de danger au niveau de la cellule ordre d'achat PO1.

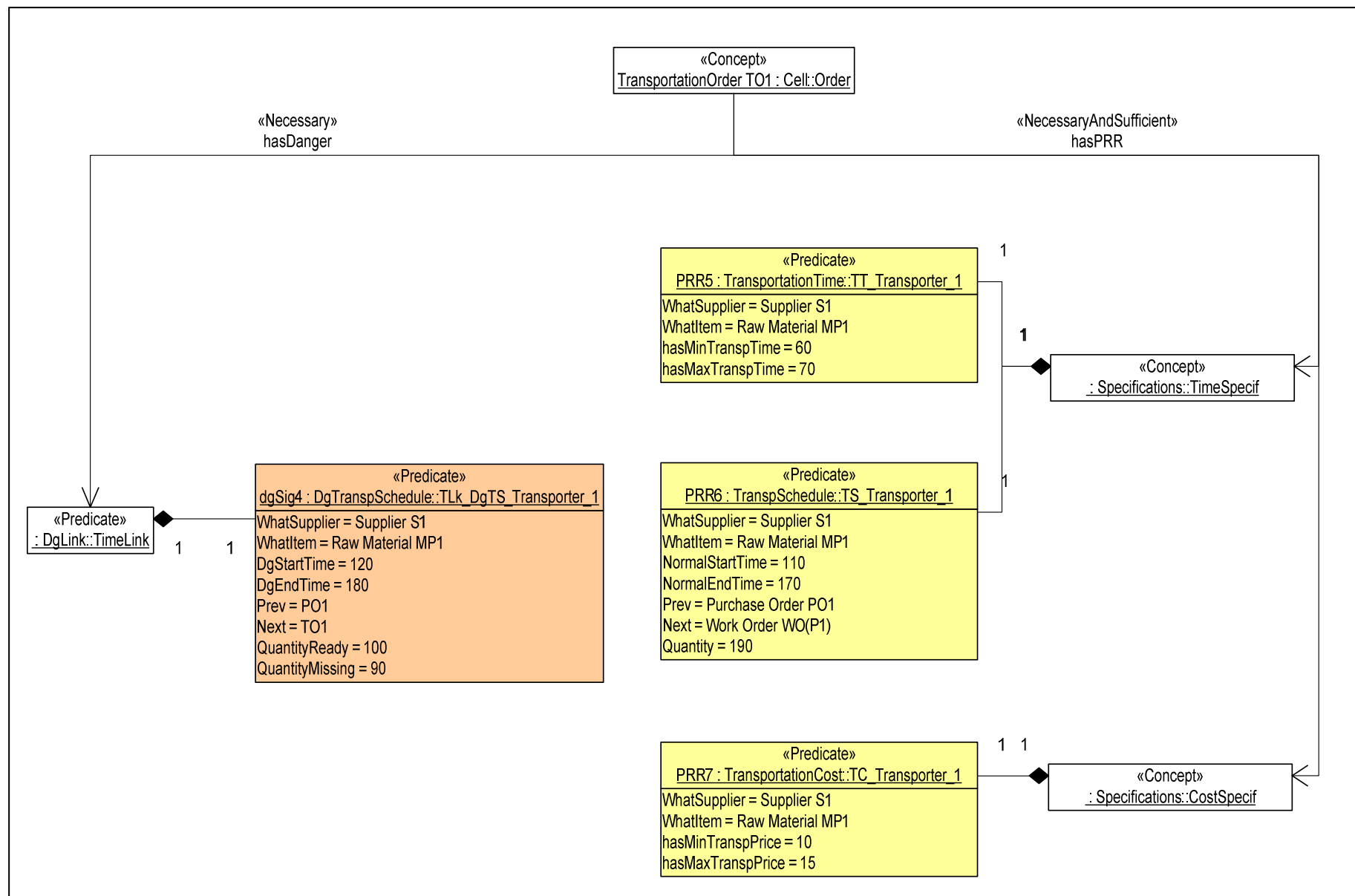


Figure 5.10: Illustration de la création de signaux de danger au niveau de la cellule ordre de transport TO1.

5.4.3. Activation d'actions de pilotage

Dans cette étape, il s'agit de déterminer les actions de pilotage qui sont capables d'intervenir sur la perturbation « *retard du fournisseur* » et sur ses conséquences. Ceci revient à activer les cellules B (simples et composées) et les cellules mémoires compétentes pour prendre en charge les antigènes et les signaux de danger.

5.4.3.1. Activation des cellules B simples

Les antigènes libérés par le pathogène, ainsi que les signaux de danger libérés par les cellules affectées stimulent les cellules B. Chaque agent associé à une cellule B accède à l'ontologie et vérifie ses restrictions pour déterminer s'il est compétent pour intervenir sur les antigènes et les signaux de dangers perçus. Dans l'affirmative, l'agent est activé et doit alors chercher des propositions pour remédier aux antigènes et/ou aux signaux de dangers perçus.

Dans le cas de la perturbation « *retard du fournisseur* », la [Figure 5.11](#) illustre la proposition de l'agent associé à la cellule B correspondant à l'action de pilotage « *Mettre à jour spécification* ». Cette cellule détecte l'antigène « *délai d'approvisionnement* » (« *Ag1* ») et est sensible au signal de danger « *délai d'approvisionnement* » (« *dgSig1* »). Ces deux signaux activent la cellule pour présenter une proposition de révision de la spécification de délai d'approvisionnement du fournisseur (« *Proposition10* »).

Cette cellule B peut être associée à la procédure qualité (au sens de la norme ISO 9000 version 2000) qui précise les modalités de révision des délais d'approvisionnement des fournisseurs. Passé un certain nombre d'occurrences de retards de livraison, une telle procédure permet de déclencher des alertes concernant ce fournisseur tout en mettant à jour automatiquement son délai d'approvisionnement.

Cette cellule B peut aussi être associée à la procédure qualité définissant les critères de sélection et d'évaluation des fournisseurs, prévue par la norme ISO 9000 version 2000. La cellule B peut alors mettre à jour les indicateurs de performance du fournisseur et conditionner ainsi le lancement de futures commandes auprès de lui selon une approche telle que celle proposée par [Moalla \(2004\)](#) pour le pilotage de la performance dans une chaîne logistique.

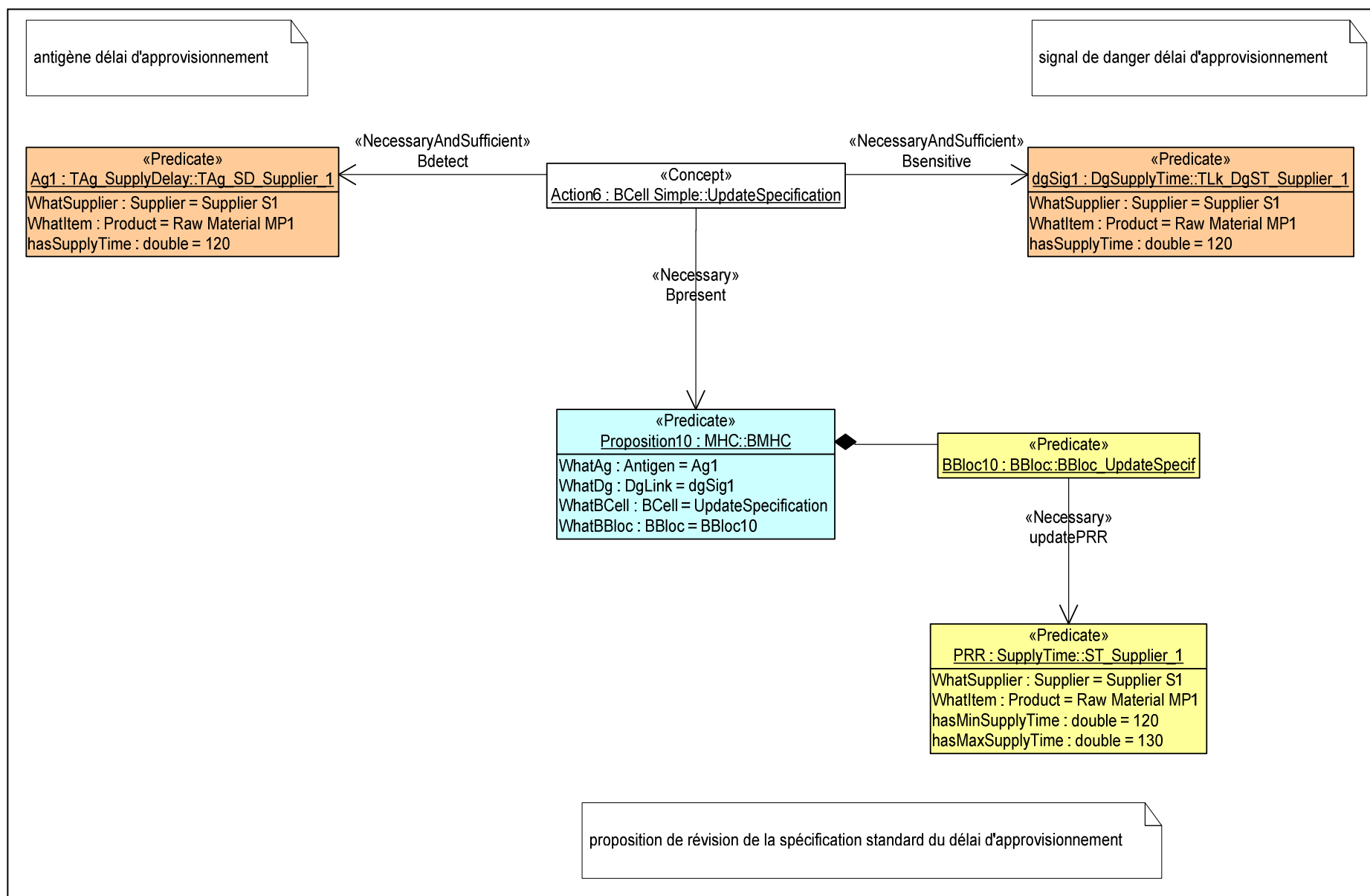


Figure 5.11: Illustration de la proposition de l'action de pilotage "Mettre à jour spécification".

Le **Tableau 5.2** illustre les actions de pilotage compétentes pour traiter le retard du fournisseur ainsi que les ordres qui en sont affectés, en l'occurrence l'ordre d'achat PO1 et l'ordre de transport TO1.

Tableau 5.2: Actions de pilotage compétentes pour traiter les ordres affectés par la perturbation « retard fournisseur ».

Cellule affectée	Cellule B	Description
Ordre d'achat PO1	Décalage à droite	Changer les dates de début et de fin de l'ordre de façon à accommoder la perturbation
	Fournisseur de substitution	Déterminer avec le fournisseur initial quelle quantité peut être mise à disposition dans les délais initiaux Trouver un fournisseur de substitution et déterminer quelle quantité peut être mise à disposition dans les délais initiaux
Ordre de transport TO1	Fournisseur de substitution	Trouver un transporteur de substitution

Les **figures A.4** et **A.5** de l'annexe illustrent respectivement les propositions des cellules B correspondant aux actions de pilotage « *décalage à droite* » et « *trouver un fournisseur de substitution* » compétentes pour intervenir sur l'ordre d'achat affecté PO1. Ces cellules détectent d'une part l'antigène « *modification de la planification initiale* » (« *Ag2* ») libéré par le pathogène « *retard du fournisseur* » et d'autre part le signal de danger « *modification de la planification initiale* » (« *dgSig2* ») libéré par la cellule ordre d'achat affectée. Comme chacune de ces cellules B est compétente pour intervenir sur cet antigène et ce signal de danger, ces deux cellules B sont activées pour proposer des actions de pilotage.

L'agent associé à la cellule B « *décalage à droite* » (« *RightShift* ») propose de modifier les dates de début et de fin initialement prévues pour l'ordre d'achat (« *Proposition4* ») de manière à lui accorder davantage de temps et ainsi accommoder la perturbation.

L'agent associé à la cellule B « *trouver un fournisseur de substitution* » (« *AltSupplier* ») cherche dans le système ERP et interagit avec les décideurs du service approvisionnement de l'entreprise pour trouver des fournisseurs capables de mettre à disposition la totalité ou une partie de la quantité de matière approvisionnée requise et ce, dans les délais impartis par la planification initiale. Dans cet exemple, la cellule B « *trouver un fournisseur de substitution* » sollicite les fournisseurs de la matière sur l'intervalle de temps situé entre la date de début de la perturbation et la date de début de l'ordre suivant. A part le fournisseur initial S1, deux autres fournisseurs sont trouvés (S2 et S3).

Le fournisseur initial (S1) peut mettre à disposition une partie seulement de la quantité manquante (« *Proposition1* »). Le fournisseur (S2) peut mettre à disposition toute la quantité manquante mais avec un léger retard par rapport à la planification initiale (« *Proposition2* »). Toutefois, ce retard est tolérable car la planification initiale admet une marge qui peut

l'absorber. Le fournisseur (S3), quant à lui, ne peut mettre à disposition qu'une partie seulement de la quantité restante dans les délais initialement prévus (« *Proposition3* »).

Ainsi, la cellule B « *trouver un fournisseur de substitution* » diffuse trois propositions distinctes aux cellules immunitaires (cellules B composées, cellules Th et mémoire). Ces propositions peuvent faire partie de la réponse à la perturbation.

La **figure A.6** de l'annexe illustre les propositions de l'agent associé à la cellule B correspondant à l'action de pilotage « *trouver un transporteur de substitution* » (« *AltTransporter* ») compétente pour intervenir sur l'ordre de transport affecté TO1. Cet agent consulte le système ERP et interagit avec les décideurs du service approvisionnement de l'entreprise pour trouver des fournisseurs de services capables de transporter la marchandise à temps.

Cette cellule détecte d'une part l'antigène « *modification de la planification initiale* » (« *Ag2* ») libéré par le pathogène « *retard du fournisseur* » et d'autre part le signal de danger (« *dgSig4* ») libéré par la cellule ordre de transport affectée. Comme l'antigène et le signal de danger sont du domaine de compétence de la cellule, elle est activée pour les prendre en compte.

La cellule fait trois propositions. Dans la première proposition (« *proposition6* »), la cellule trouve un transporteur (T3) pour transporter seulement la quantité disponible de la partie totale.

Dans la deuxième proposition (« *proposition7* »), la cellule a vérifié que le transporteur initial (T1) reste disponible pour transporter la quantité totale prévue, mais avec un décalage qui accommode la perturbation. Cette proposition est équivalente à un décalage à droite de l'ordre de transport affecté TO1. Cette proposition est effectuée par la cellule « *trouver un transporteur de substitution* » et non pas par la cellule « *décalage à droite* » parce qu'il faut vérifier auprès du transporteur (qui est un fournisseur de service) sa disponibilité sur le nouvel intervalle de temps requis.

Enfin, dans la troisième proposition (« *proposition8* »), la cellule a vérifié l'existence d'un transporteur (T2) qui peut s'acquitter de l'ordre de transport sur un nouvel intervalle de temps.

Ainsi, la cellule B « *trouver un transporteur de substitution* » diffuse trois propositions distinctes aux cellules immunitaires (cellules B composées, cellules Th et mémoire). Ces propositions peuvent faire partie de la réponse à la perturbation.

5.4.3.2. Activation des cellules B composées

La **figure A.5** de l'annexe montre que la cellule B « *trouver un fournisseur de substitution* » sollicite le fournisseur initial (S1) pour avoir une estimation de la quantité qu'il peut mettre à disposition sur l'intervalle de temps correspondant à la planification initiale. Ce fournisseur ne peut mettre à disposition qu'une partie (quantité = 60) de la quantité manquante (quantité = 90). La même cellule B sollicite le fournisseur (S3) qui, lui aussi, ne peut mettre à disposition qu'une partie (quantité = 50) de la quantité manquante (quantité = 90).

Chacun des fournisseurs S1 et S3 sollicité tout seul ne peut satisfaire la quantité manquante. Toutefois, ces deux fournisseurs sollicités ensemble peuvent mettre à disposition la quantité manquante. Ceci nécessite de subdiviser l'ordre d'achat initial en deux ordres d'achat adressés simultanément à ces deux fournisseurs.

Une telle décision est une action composée qui met en œuvre deux actions de pilotage simples. Cette action de pilotage composée est mise en œuvre par une cellule B composée permettant de « *subdiviser un ordre d'achat* ». La proposition de l'agent associé à cette cellule est illustrée par la [Figure 5.12](#).

Cette cellule B composée détecte l'antigène « *modification de la planification initiale* » (« *Ag2* ») libéré par le pathogène, ainsi que le signal de danger (« *dgSig2* ») émis par la cellule ordre d'achat PO1. En plus, la cellule est stimulée par les propositions (1 et 3) de la cellule B « *trouver un fournisseur de substitution* ». Comme toutes les conditions sont réunies, la cellule B composée est activée et fait la proposition de subdiviser l'ordre d'achat initial en deux ordres d'achat partiels adressés simultanément aux fournisseurs S1 et S3 pour compléter la quantité manquante.

La proposition de cette cellule B composée vient sous la forme d'un individu (« *proposition5* ») de la classe « *BMHC* » composé de deux individus (« *BBloc51* » et « *BBloc52* ») de la classe « *BBloc* ». Ces deux individus détaillent l'action de la cellule. L'individu (« *BBloc51* ») correspond à l'action de lancer un premier ordre partiel auprès du fournisseur S1 avec une quantité ($q = 50$). L'individu (« *BBloc52* ») correspond à l'action de lancer un deuxième ordre partiel auprès du fournisseur S2 avec une quantité ($q = 40$).

De même, la [figure A.6](#) de l'annexe montre que la cellule B « *trouver un transporteur de substitution* » sollicite le transporteur (T3) pour transporter une quantité partielle (« *proposition6* »). Cette proposition prise toute seule conduit à la création d'un ordre de transport d'une quantité partielle ($q = 100$) qui ne peut pas satisfaire le besoin de transporter toute la quantité approvisionnée ($q = 190$).

Pour satisfaire ce besoin, la proposition 6 doit être épaulée par une deuxième proposition qui vient la compléter, par exemple la proposition 7. Ceci conduit à une décision de pilotage qui subdivise l'ordre de transport initial en deux ordres de transport partiels.

Cette décision peut être mise en œuvre par une action de pilotage composée « *subdiviser ordre de transport* ». La proposition de l'agent associé à cette cellule est illustrée par la [figure A.7](#) de l'annexe. Cette cellule détecte l'antigène « *modification de la planification initiale* » (« *Ag2* ») ainsi que le signal de danger (« *dgSig4* ») émis par la cellule ordre de transport TO1. En plus, la cellule est stimulée par les propositions 6 et 7 de la cellule B « *trouver un transporteur de substitution* ». Comme toutes les conditions sont réunies, la cellule est activée et fait la proposition de subdiviser l'ordre de transport initial en deux ordres de transport partiels adressés respectivement aux transporteurs T3 et T1.

La proposition de cette cellule B composée vient sous la forme d'un individu (« *proposition9* ») de la classe « *BMHC* » composé de deux individus (« *BBloc91* » et « *BBloc92* ») de la classe « *BBloc* ». Ces deux individus détaillent l'action de la cellule. L'individu (« *BBloc91* ») correspond à l'action de lancer un premier ordre partiel auprès du Transporteur T3 pour transporter la quantité ($q = 100$). L'individu (« *BBloc92* ») correspond à

l'action de lancer un deuxième ordre partiel auprès du transporteur T1 pour transporter la quantité ($q = 90$).

De façon plus générale, la cellule B composée « *subdiviser un ordre* » permet de gérer l'allocation d'une demande d'approvisionnement (achat, transport, sous-traitance) à un ensemble de fournisseurs disponibles. La demande d'approvisionnement est donnée par le signal de danger émis par une cellule ordre d'approvisionnement affectée. L'ensemble des fournisseurs disponibles est déterminé par les propositions des cellules B simples (« *trouver un fournisseur de substitution* » pour un ordre d'achat, « *trouver un transporteur de substitution* » pour un ordre de transport, ...). La cellule B composée détermine alors parmi les fournisseurs disponibles, quels fournisseurs choisir et quelle quantité allouer à chaque fournisseur. Pour ce faire, cette cellule B est associée à l'algorithme de **Ruis – Torres et Mahmoodi (2006)** qui permet de déterminer l'allocation optimale de la demande à des fournisseurs tout en tenant compte du risque de défaillance de livraison.

En fonction du système de production, cette même cellule B peut être associée à d'autres algorithmes que celui de **Ruis – Torres et Mahmoodi (2006)**. Ces algorithmes peuvent être plus performants ou simplement mieux adaptés au contexte considéré. L'approche immunitaire peut intégrer d'autres outils sans nécessiter de modification de structure, ce qui lui confère une genericité par rapport aux outils d'aide à la décision utilisés, et montre les possibilités de flexibilité et d'extensibilité qu'elle offre.

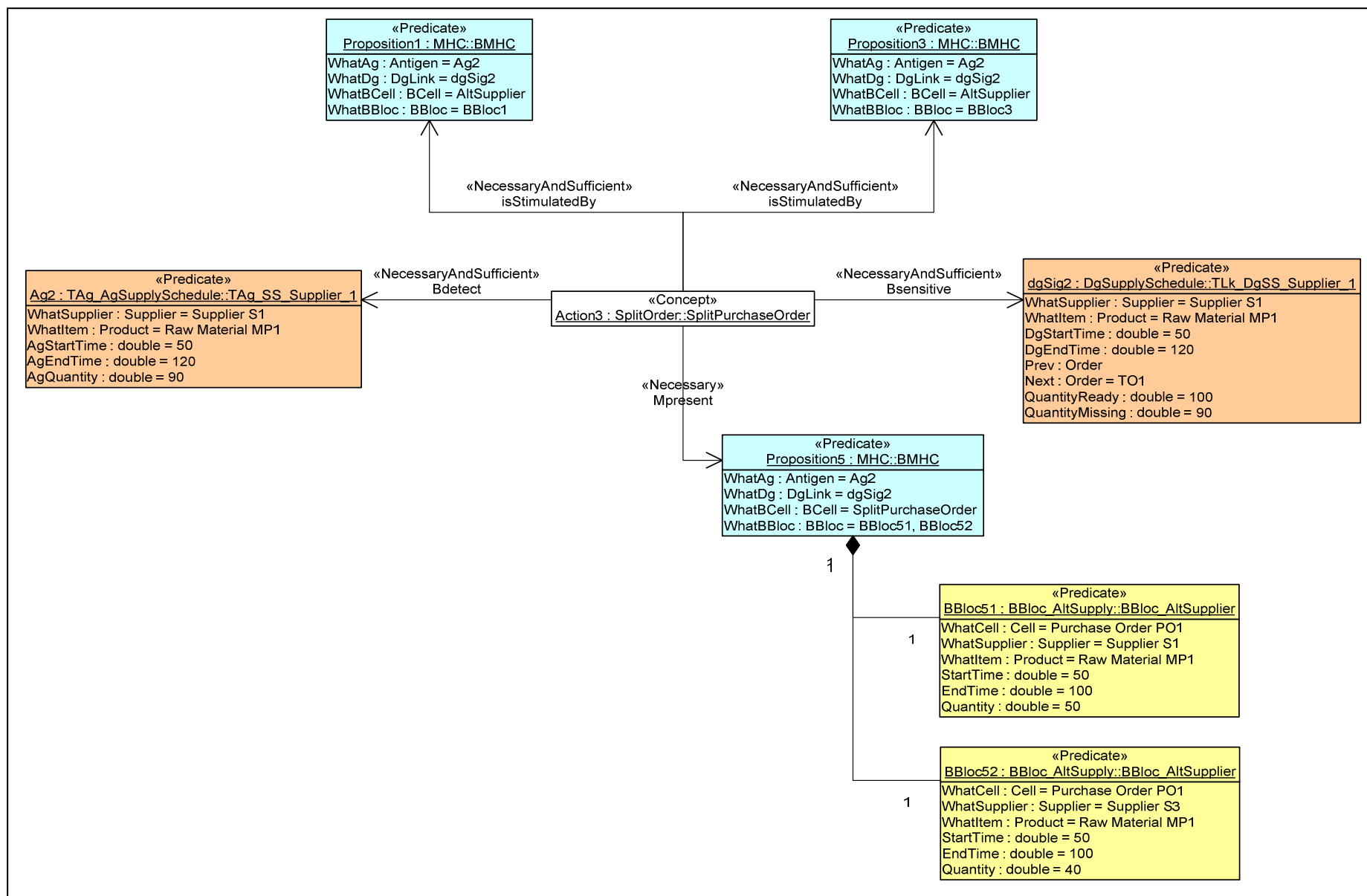


Figure 5.12: Illustration de la proposition de la cellule B composée "subdiviser ordre d'achat" appliquée à l'ordre d'achat PO1.

5.4.4. Aide à l'élaboration d'une réaction à la perturbation

Les antigènes, les signaux de danger ainsi que les propositions des cellules B et des éventuelles cellules mémoires sont perçus par une cellule Th, comme l'illustre la [Figure 5.13](#).

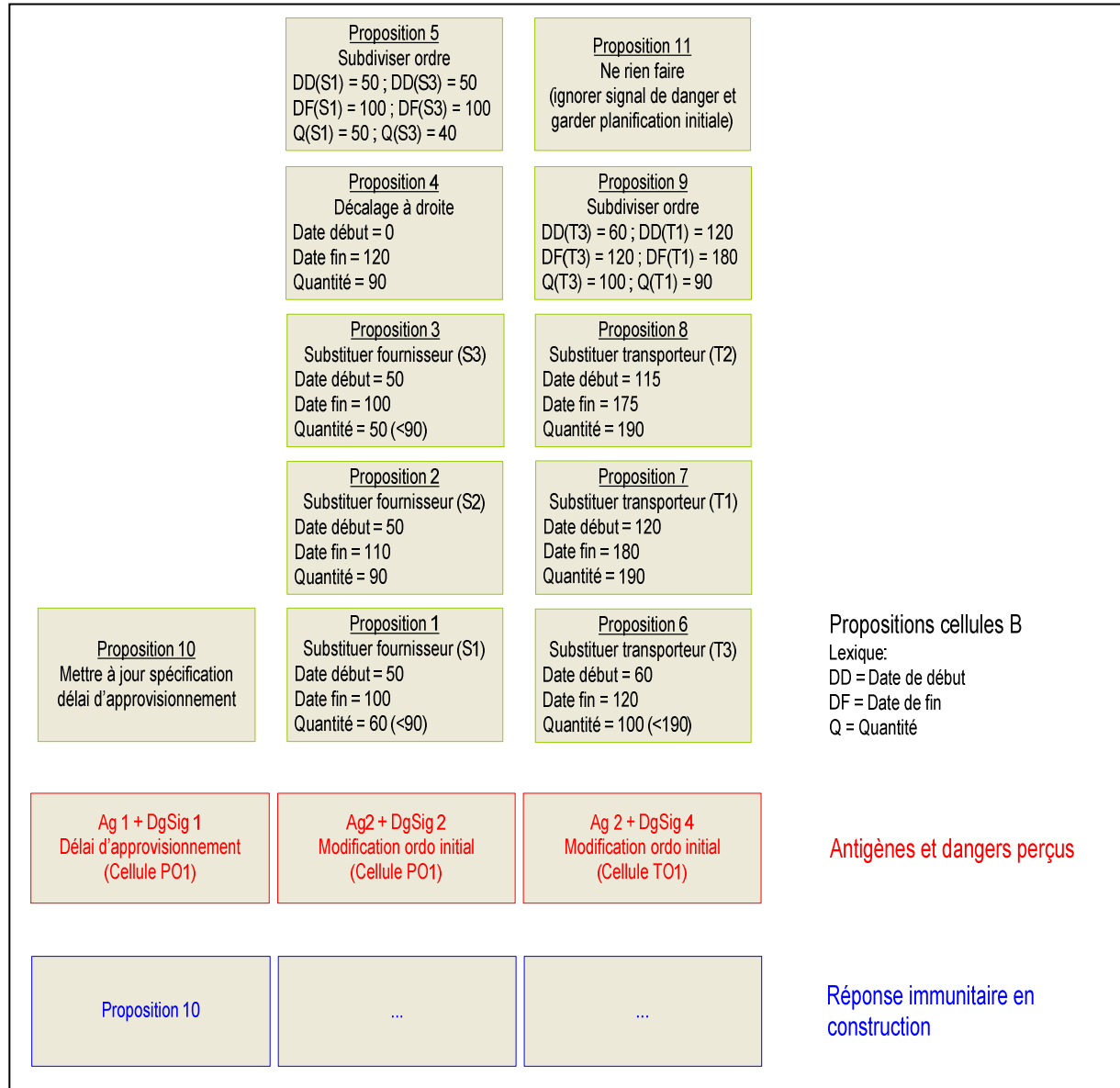


Figure 5.13: Représentation schématique du contenu d'une cellule Th.

La cellule Th est en charge de coordonner une réponse à la perturbation et à ses conséquences. Pour ce faire, cette cellule montre au chef d'atelier la perturbation (antigènes), ses conséquences (signaux de danger), et les actions de pilotage disponibles pour y réagir (propositions des cellules B et mémoire).

La cellule Th propose au chef d'atelier des réponses en affectant à chaque antigène et signal de danger une proposition d'une cellule B ou mémoire. Par contre, elle lui confie la responsabilité de sélectionner les réponses cohérentes et lui donne la possibilité de supprimer celles qui présentent des conflits ou des incohérences. La cellule Th permet de capturer les

choix de ce décideur en tant que réponses immunitaires qui sont ensuite affinées en stimulant les cellules B. A ce stade, notre maquette permet aussi d'aider le chef d'atelier à évaluer la performance et les conséquences résiduelles de la perturbation pour chaque réponse capturée.

Dans le cas de l'exemple de la défaillance du fournisseur, la [Figure 5.14](#) illustre quelques exemples de réactions proposées par la cellule Th.

En ce qui concerne l'antigène et le signal de danger ($Ag1 + DgSig1$) portant sur le délai d'approvisionnement, une seule proposition est disponible (Proposition10). Elle concerne la mise à jour de la spécification du délai d'approvisionnement. Cette proposition va se retrouver systématiquement dans toutes les solutions préconisées par la cellule Th.

Pour l'ordre d'achat PO1 affecté, la réponse R1 sélectionne la proposition 1 dans laquelle une quantité partielle inférieure à la quantité manquante est approvisionnée. Pour l'ordre de transport TO1 affecté, la réponse R1 ignore le signal de danger et garde l'ordre de transport initialement prévu par la planification. Dans cette réaction, il s'agit donc de transporter une partie seulement de la quantité initialement prévue. Le transport est assuré entre la date de début (110) et la date de fin (170) de l'ordre de transport initialement prévus par la planification.

La réponse R1 est une réponse partielle qui ne permet pas de supprimer totalement toutes les conséquences de la perturbation. Pour la cellule associée à l'ordre d'achat PO1, la conséquence résiduelle correspond dans cet exemple à la quantité manquante non livrée. Pour la cellule associée à l'ordre de transport TO1, la conséquence résiduelle correspond dans cet exemple à la quantité manquante non transportée.

La réponse R2 correspond au décalage à droite dans le temps des ordres d'achat PO1 et de transport TO1 affectés par la perturbation. Dans ce cas, le transport total de la quantité approvisionnée est assuré. Cette réponse est capable d'éliminer totalement la perturbation et ses conséquences. Il n'y a donc pas de conséquences résiduelles.

La réponse R3 subdivise l'ordre d'achat en deux ordres partiels, et substitue le transporteur initial par un autre transporteur. Dans ce cas aussi, le transport total de la quantité approvisionnée est assuré. Cette réaction est capable d'éliminer totalement la perturbation et ses conséquences. Il n'y a donc pas de conséquences résiduelles.

La performance des réponses proposées par la cellule Th peut être évaluée en termes de coût total d'approvisionnement. Le chef d'atelier évalue les conséquences résiduelles des réponses sur les cellules affectées. La meilleure réponse, présentant le meilleur compromis entre bonne performance et conséquences résiduelles acceptables est sélectionnée et validée par le chef d'atelier pour être appliquée. Dans ce cas, chaque cellule B impliquée dans la réponse supprime les liens de spécification affectés et les remplace par de nouveaux liens de spécification reflétant la réponse.

La cellule Th enregistre la réponse sélectionnée dans l'ontologie en tant que cellule mémoire. La [Figure 5.15](#) illustre par exemple la mémorisation de la réponse R3 de la [Figure 5.14](#) en tant que cellule mémoire. Notons qu'à part les antigènes, les signaux de danger et les actions de pilotage, les indicateurs de performance avant et après la réaction sont aussi mémorisés.

	Réponse		
R1	<div>Ag 1 + DgSig 1 Délai d'approvisionnement (Cellule PO1)</div>	<div>Ag2 + DgSig 2 Modification ordo initial (Cellule PO1)</div>	<div>Ag 2 + DgSig 4 Modification ordo initial (Cellule TO1)</div>
	<div>Proposition 10 Mettre à jour spécification délai d'approvisionnement</div>	<div>Proposition 1 Substituer fournisseur (S1) Date début = 50 Date fin = 100 Quantité = 60 (<90)</div>	<div>Proposition 11 Ne rien faire (ignorer signal de danger et garder planification initiale)</div>
R2	<div>Ag 1 + DgSig 1 Délai d'approvisionnement (Cellule PO1)</div>	<div>Ag2 + DgSig 2 Modification ordo initial (Cellule PO1)</div>	<div>Ag 2 + DgSig 4 Modification ordo initial (Cellule TO1)</div>
	<div>Proposition 10 Mettre à jour spécification délai d'approvisionnement</div>	<div>Proposition 4 Décalage à droite Date début = 0 Date fin = 120 Quantité = 90</div>	<div>Proposition 7 Substituer transporteur (T1) Date début = 120 Date fin = 180 Quantité = 190</div>
R3	<div>Ag 1 + DgSig 1 Délai d'approvisionnement (Cellule PO1)</div>	<div>Ag2 + DgSig 2 Modification ordo initial (Cellule PO1)</div>	<div>Ag 2 + DgSig 4 Modification ordo initial (Cellule TO1)</div>
	<div>Proposition 10 Mettre à jour spécification délai d'approvisionnement</div>	<div>Proposition 5 Subdiviser ordre DD(S1) = 50 ; DD(S3) = 50 DF(S1) = 100 ; DF(S3) = 100 Q(S1) = 50 ; Q(S3) = 40</div>	<div>Proposition 8 Substituer transporteur (T2) Date début = 115 Date fin = 175 Quantité = 190</div>
Figure 5.14: Illustration de quelques exemples de réponses proposées par la cellule Th.			

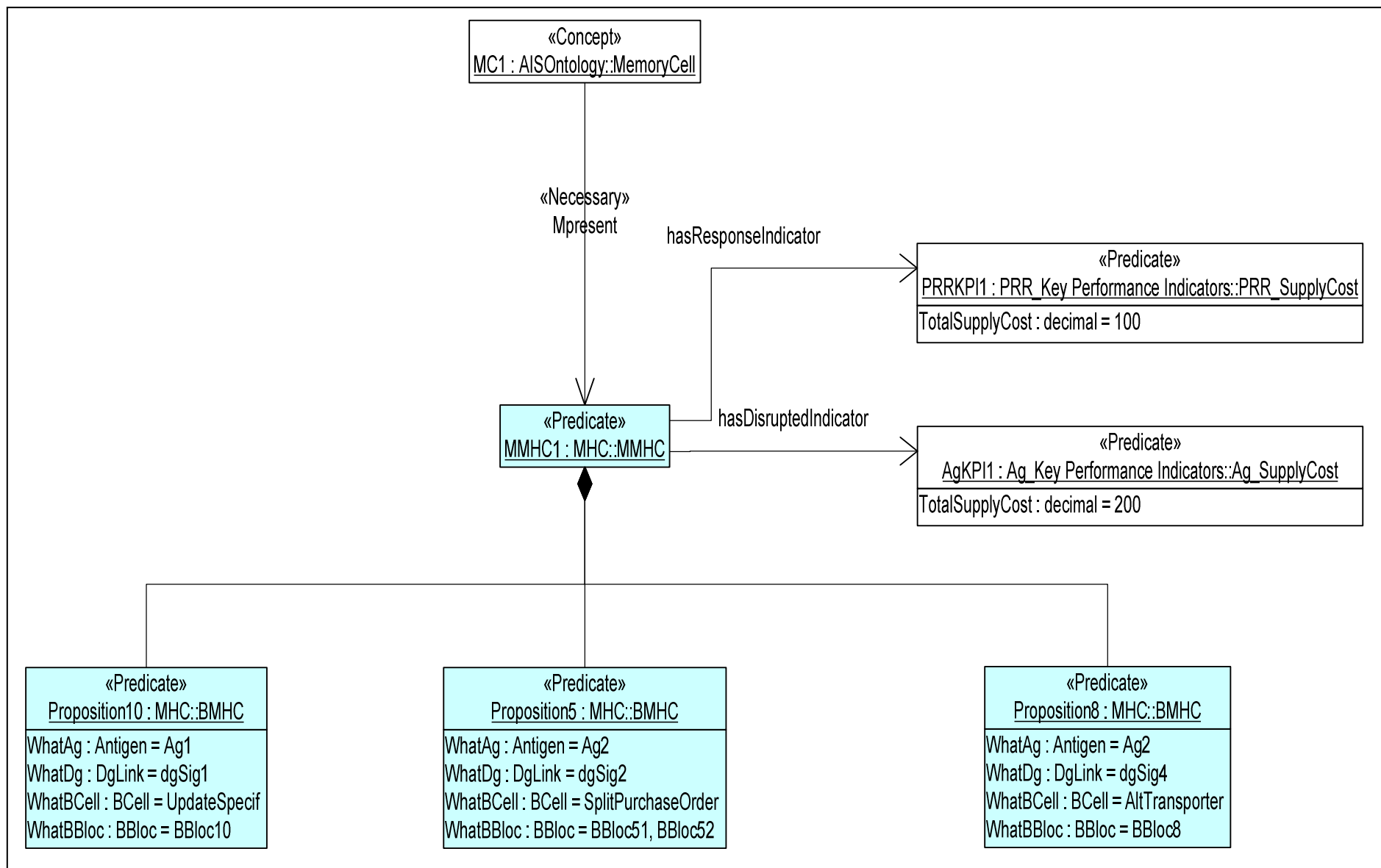


Figure 5.15: Illustration d'une cellule mémoire.

5.5. Exemple 2 : défaillance d'une ressource de production

Dans cet exemple, nous illustrons comment il est possible de prendre en compte et de gérer une perturbation du type défaillance d'une ressource de production.

5.5.1. Détection de la perturbation

Plusieurs scénarios peuvent conduire à la détection d'une perturbation du type défaillance d'une ressource de production. Distinguons deux scénarios en particulier :

1^{er} scénario : la perturbation est subite. Dans ce cas, l'un des décideurs du système de production (responsable de la maintenance ou chef d'atelier) se charge de l'introduire dans le système. Ce décideur introduit un pathogène « *panne machine* » dont l'antigène temps renseigne une estimation de la durée de la panne, tel que l'illustre la [Figure 5.16](#). Cette estimation peut provenir des experts du service de maintenance, d'un système de diagnostic et d'aide à la maintenance externe ou bien de l'historique des pannes de la machine. L'ontologie elle-même peut aider à estimer cette durée puisqu'elle détient déjà un historique des pannes des ressources, ce qui illustre un des aspects du principe de mémoire immunitaire.

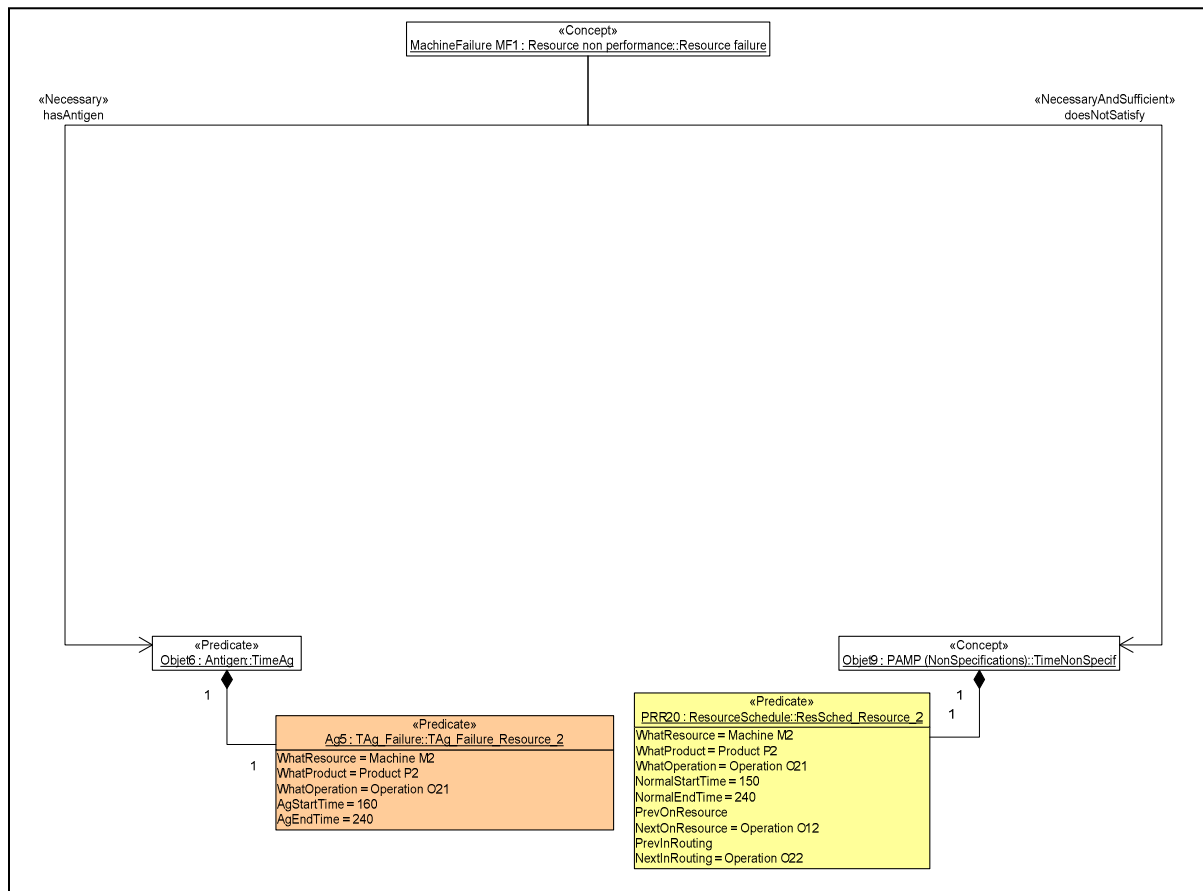


Figure 5.16: Illustration du pathogène introduit suite à la déclaration par un décideur d'une perturbation subite de type panne machine.

2^e scénario : la perturbation est détectée à partir de déviations mesurées à partir du système de production. Dans ce cas, c'est la supervision des spécifications des cellules qui permet de détecter la perturbation.

Par exemple, en surveillant les paramètres d'une ressource de production, toute déviation hors tolérances peut correspondre à des symptômes révélateurs d'une panne. Ainsi, la [Figure 5.18](#) permet d'illustrer un pathogène « *panne machine* » introduit par la cellule APC en charge de la détection des défaillances des ressources. Ce pathogène est créé suite à la détection d'une déviation entre les spécifications et les mesures des paramètres de température et de pression de la machine.

En effet, dès le commencement du traitement de l'opération O21 sur la machine M2 (cf. [Figure 5.1](#)), la cellule associée à cette opération communique ses spécifications à la cellule APC en charge de la détection des défaillances des ressources. Ces spécifications correspondent à des valeurs nominales de réglage des paramètres de température et de pression que la machine doit satisfaire pendant son fonctionnement normal.

A la date ($t=160$, cf. [Figure 5.17](#)), en surveillant ces paramètres, la cellule APC détecte des écarts non tolérables. A partir de la consultation des restrictions des classes de perturbation de l'ontologie, la cellule APC détermine que les écarts détectés correspondent aux restrictions décrivant la classe « *pannes machine M2* ». C'est ainsi que la cellule APC peut déduire que les événements détectés correspondent à une perturbation de type « panne de la machine M2 ». La cellule APC crée alors un pathogène de type « *panne machine* » comme l'illustre la [Figure 5.18](#). Dans ce pathogène, elle renseigne les antigènes qualité correspondant aux spécifications qualité qui n'ont pas été satisfaites et qui ont conduit à la détection de la panne. Aussi, la cellule APC renseigne un antigène temps qui porte une estimation de la durée de la panne et la modification de la planification initiale qui en découle.

Notons ici que c'est le même principe immunitaire qui permet de détecter deux types différents de perturbations. Dans le premier exemple de défaillance d'un fournisseur, la surveillance des spécifications d'un ordre d'achat permet de détecter un retard du fournisseur. Dans l'exemple de défaillance d'une ressource de production, la surveillance des spécifications d'une opération de production permet de détecter une panne machine. Ceci illustre la généricité par rapport à différents types de perturbations de la fonction de détection, basée sur le principe immunitaire de discrimination Soi/Non Soi et sur les concepts de PAMP et de PRR.

La Figure 5.17 montre un diagramme GANTT qui illustre la panne de la machine M2 ainsi que sa propagation selon l'axe du temps.

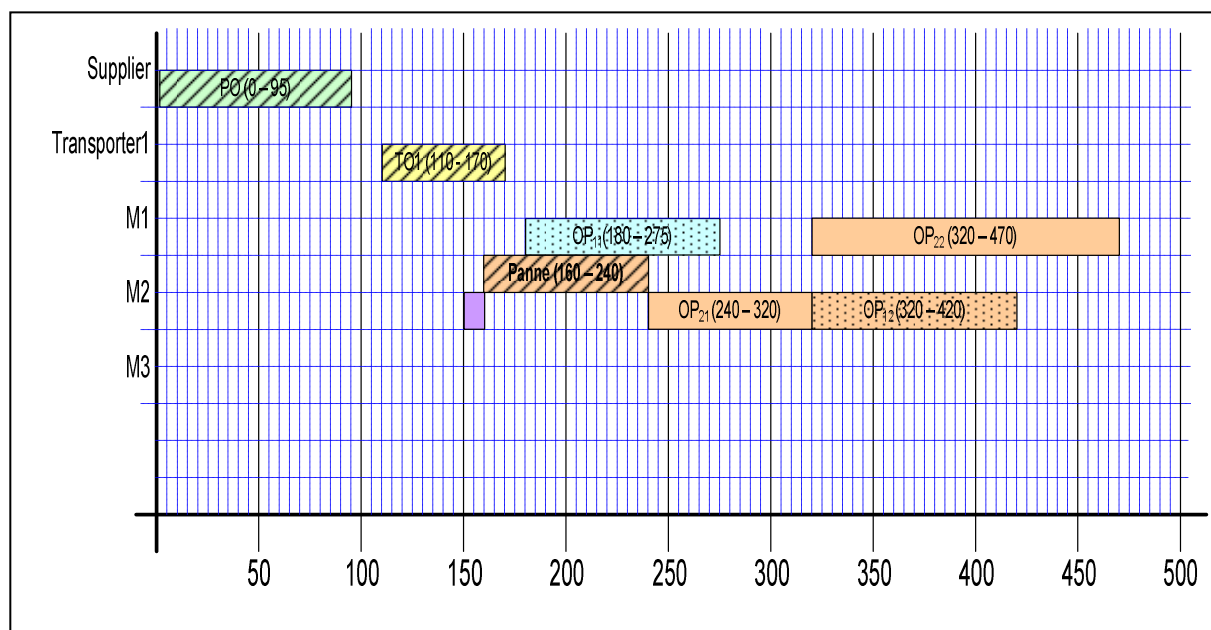


Figure 5.17: Illustration de la panne de la machine M2 (entre les dates t=160 et t=240) et de ses conséquences.

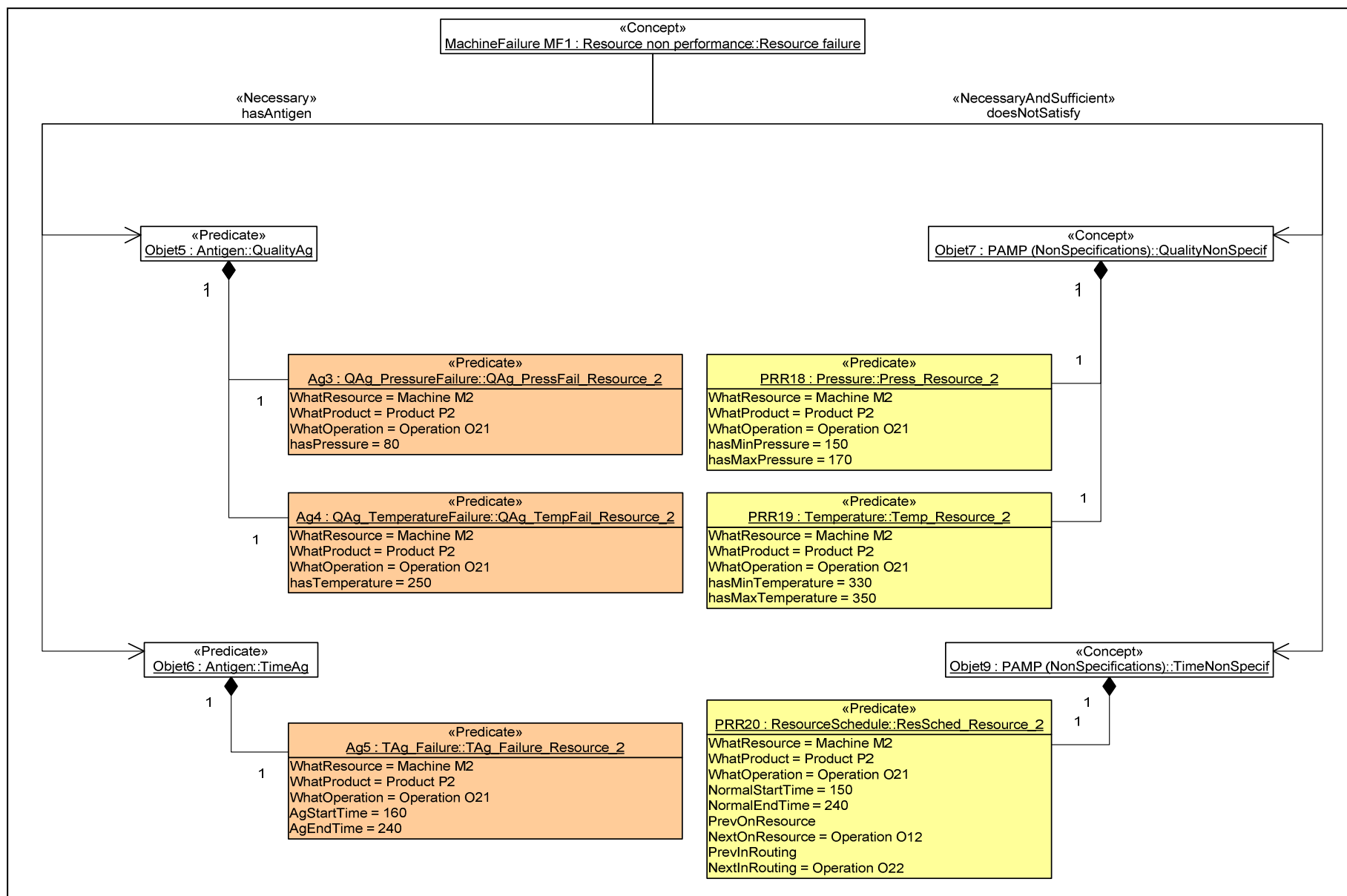


Figure 5.18: Illustration d'un pathogène « panne machine » introduit par la cellule APC en charge de la détection des défaillances des ressources

5.5.2. Identification des conséquences de la perturbation

En continuant avec le 2^e scénario du paragraphe précédent, le pathogène « *panne machine M2* » créé et introduit dans le système libère ses antigènes, lesquels vont aggraver des cellules.

La [Figure 5.19](#) illustre schématiquement la propagation des signaux de danger parmi les cellules affectées, permettant ainsi d'identifier les conséquences de la perturbation. Les [figures A.8 à A.14](#) de l'annexe reprennent la [Figure 5.19](#) plus en détail pour illustrer les cellules affectées et les signaux de danger générés par cette perturbation. Ces signaux de danger sont stockés dans l'ontologie et servent à stimuler les actions de pilotage appropriées.

Lorsque la cellule associée à l'opération 21 perçoit les antigènes libérés par le pathogène, elle détermine que ses liens de spécification de réglage de la pression (« *PRR18* »), de la température (« *PRR19* ») et de la cadence de production (« *PRR21* ») sont affectés par les antigènes qualité du pathogène. Dans notre maquette informatique, nous avons eu recours à des règles et à des procédures de vérification spécifiques à chaque lien de spécification pour déterminer la conséquence des antigènes qualité sur les spécifications de la cellule. Trois liens de danger sont alors créés pour refléter la mise en danger de ces liens de spécification. Ces liens de danger mentionnent les mesures de température (« *dgSig5* ») et de pression (« *dgSig4* ») qui sont hors tolérances ainsi que la modification de la cadence de production (« *dgSig7* »). Comme on le verra dans la section suivante, ces liens de danger servent à stimuler des actions de pilotage compétentes telles qu'une action de maintenance corrective.

La spécification d'ordonnancement initial (« *PRR20* ») de la cellule opération 21, qui est une spécification de temps de la cellule, est affectée par l'antigène temps du pathogène. En effet, la durée de la panne de la machine M2 affecte l'intervalle de temps initialement prévu par l'ordonnancement pour exécuter l'opération 21 sur cette machine. Un lien de danger (« *dgSig6* ») est alors créé pour refléter le danger de modification de l'ordonnancement initial de l'opération. Comme on le verra dans la section suivante, ce lien de danger sert à stimuler des actions de pilotage compétentes telles que les actions de ré ordonnancement de l'opération (reséquencement sur la même machine ou réaffectation vers une machine équivalente). La [figure A.8 de l'annexe](#) permet d'illustrer les liens de spécification ainsi que les liens de danger de la cellule opération 21.

La cellule opération 21 diffuse les liens de danger (« *dgSig4, 5, 6 et 7* ») en tant que signaux de danger. Ces signaux sont perçus par les cellules environnantes qui sont la cellule associée à la gamme opératoire du produit P2 et la cellule associée à l'opération 12 qui est programmée à la suite de l'opération 21 sur la même machine.

La cellule associée à la gamme opératoire du produit P2 fabriqué perçoit le signal de danger (« *dgSig6* ») portant sur la modification de l'ordonnancement initial de la cellule opération 21. Grâce à des règles et des procédures de vérification spécifiques à chaque lien de spécification, la cellule détermine l'impact de ce signal de danger sur ses liens de spécification de temps qui les lient avec les opérations 21 et 22.

Le signal de danger (« *dgSig11* ») de la [figure A.11 de l'annexe](#) correspond à la mise en danger du lien de spécification de temps qui lie la cellule gamme à la cellule opération 21. De même, le signal de danger (« *dgSig12* ») correspond à la mise en danger du lien de spécification de temps qui lie la cellule gamme à la cellule opération 22.

Comme on en verra un exemple dans la section suivante, les liens de danger (« *dgSig11 et 12* ») servent à stimuler des actions de pilotage compétentes telles que la substitution d'une opération de gamme par une ou plusieurs opérations équivalentes, ou encore la sous-traitance d'une opération de gamme.

La cellule associée à l'ordre de fabrication de l'article P2 perçoit les signaux de danger (« *dgSig11 et 12* »). Cette cellule détermine l'impact de ces signaux sur la date d'échéance de l'ordre. Comme cette date est affectée, la cellule génère le signal de danger (« *dgSig16* ») illustré par la [figure A.13 de l'annexe](#). Comme on en verra un exemple dans la section suivante, ce signal peut servir à stimuler des actions de pilotage compétentes telles que la substitution ou la sous-traitance de l'ensemble des opérations de la gamme opératoire.

La cellule associée à l'opération 22 perçoit le signal de danger (« *dgSig12* ») diffusé par la cellule associée à la gamme de fabrication du produit P2. La cellule opération 22 détermine qu'elle est mise en danger et génère le signal de danger (« *dgSig9* ») illustré par la [figure A.9 de l'annexe](#).

La cellule associée à l'opération 12 perçoit le signal de danger concernant la modification de l'ordonnancement initial de la cellule opération 21 qui la précède sur la machine M2 en panne. Elle détermine sa mise en danger et génère le signal de danger (« *dgSig13* ») illustré par la [figure A.10 de l'annexe](#). Ainsi, la modification de l'ordonnancement initial de l'opération 21 influence les ordonnancements initiaux des opérations 22 et 12.

La cellule gamme opératoire du produit P1 fabriqué perçoit le signal de danger (« *dgSig13* ») portant sur la modification de l'ordonnancement initial de l'opération 12. Elle génère à son tour le signal de danger (« *dgSig14* ») illustré par la [figure A.12 de l'annexe](#).

La cellule associée à l'ordre de fabrication de l'article P1 perçoit le signal de danger (« *dgSig14* »). Cette cellule détermine l'impact de ce signal de danger sur la date d'échéance de l'ordre. Comme cette date est affectée, la cellule génère le signal de danger (« *dgSig15* ») illustré par la [figure A.14 de l'annexe](#).

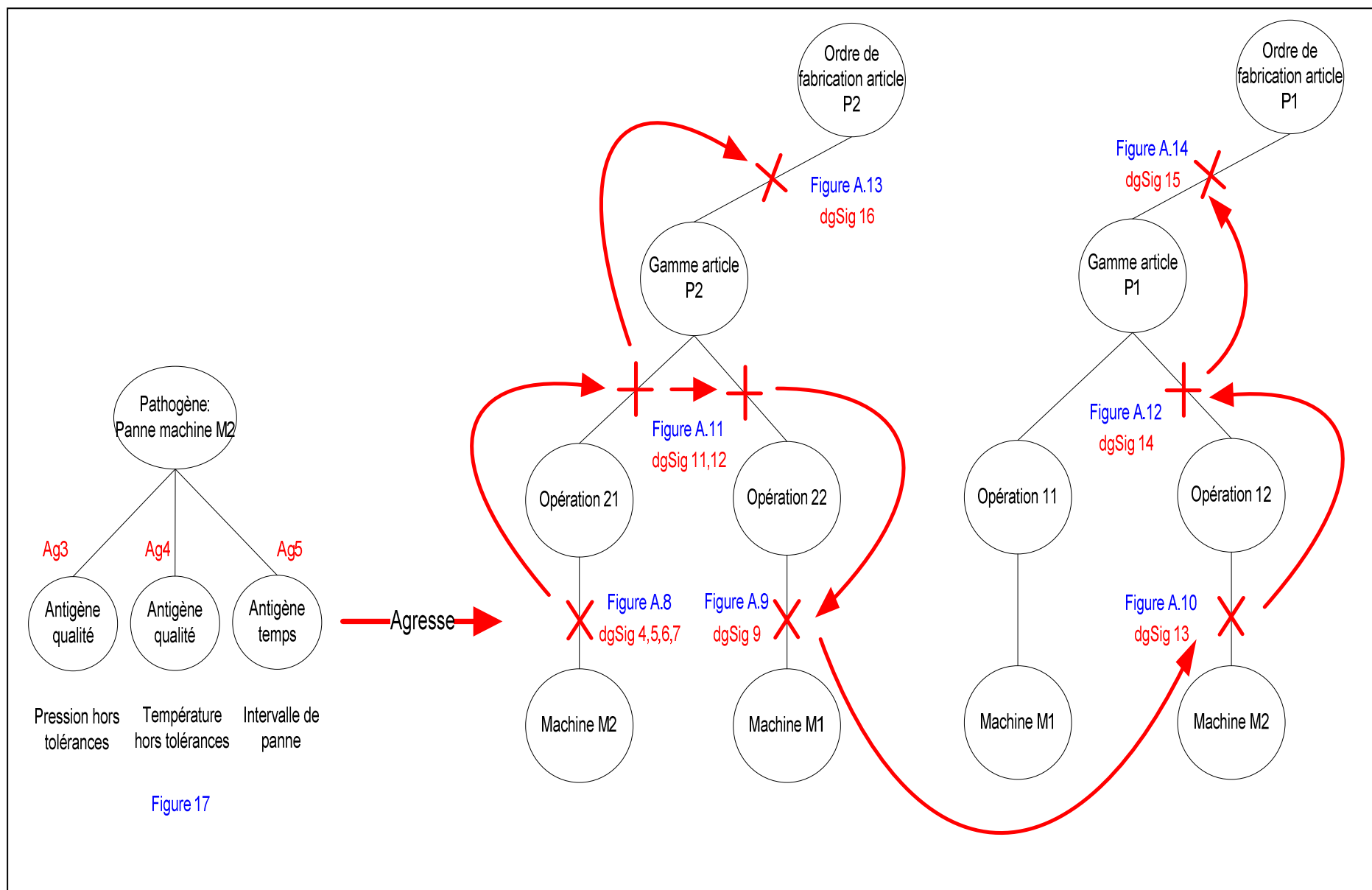


Figure 5.19: Propagation des signaux de danger et identification des conséquences de la perturbation "panne machine M2".

5.5.3. Activation d'actions de pilotage

Dans cette étape, il s'agit de déterminer les actions de pilotage qui sont capables d'intervenir sur la perturbation « *panne machine M2* » et sur ses conséquences. Ceci revient à activer les cellules B et les cellules mémoires compétentes pour prendre en charge les antigènes et les signaux de danger.

5.5.3.1. Activation de cellules B simples

Les antigènes et les signaux de danger permettent d'orienter le choix des cellules B associées aux actions de pilotage compétentes pour intervenir sur la perturbation et ses conséquences. Par rapport au premier exemple, le pathogène associé à la défaillance du fournisseur libère des antigènes dont le type est différent de celui des antigènes libérés par le pathogène associé à la défaillance d'une ressource. Cette différence permet d'orienter l'activation des cellules B en fonction de leur affinité avec la perturbation considérée et confère à la structure une dimension de généricité par rapport à l'aptitude de prendre en compte une variété de types de perturbations.

Les antigènes qualité (« *Ag3, Ag4* ») et temps (« *Ag5* ») libérés par le pathogène « *panne machine M2* », ainsi que les signaux de danger (« *dgSig4, 5, 7* ») libérés par la cellule associée à l'opération O21 affectée stimulent la cellule B « *maintenance corrective et préventive* », comme l'illustre schématiquement la [Figure 5.20](#).

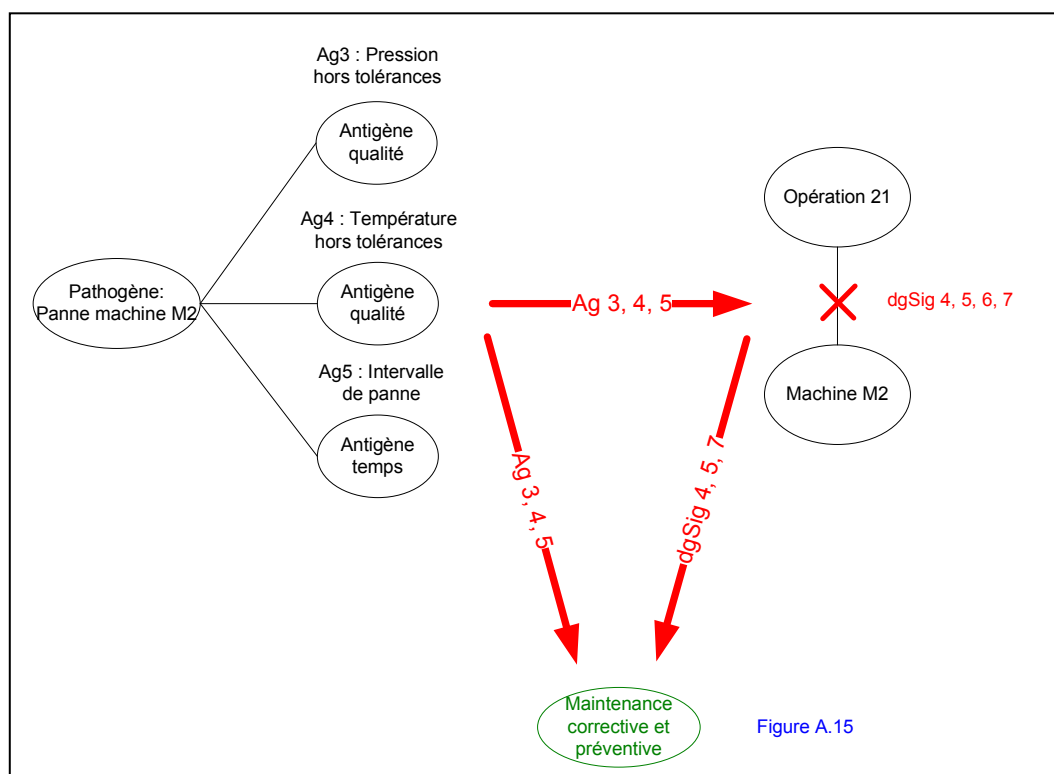


Figure 5.20: Illustration de la cellule B simple "maintenance corrective et préventive" stimulée par les antigènes et les signaux de danger.

L'annexe A.15 reprend la Figure 5.20 plus en détail, en illustrant la proposition de la cellule B « maintenance corrective et préventive ». Cette cellule B peut interfacer le système de gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO) et interagir avec les décideurs du service maintenance. D'une part, cette cellule est sensible aux antigènes qualité (« Ag3, Ag4 ») et temps (« Ag5 ») définissant les symptômes de la perturbation « panne machine M2 ». D'autre part, cette cellule est sensible aux signaux de danger (« dgSig4, dgSig 5 et dgSig 7 ») libérés par la cellule associée à l'opération O21 affectée par la perturbation. Ces signaux de danger reflètent les conséquences de la panne sur la cellule affectée, qui sont du domaine de compétence de la maintenance (température, pression, et cadence de production hors tolérances).

La cellule B « maintenance corrective et préventive » propose de créer un ordre de maintenance permettant de prendre en compte la perturbation. Cet ordre de maintenance est créé et lancé dans le système en tant que cellule artificielle ayant des spécifications de temps, de coût et de qualité.

Les antigènes et les signaux de danger permettent de recruter d'autres cellules B pour réagir aux conséquences de la perturbation. À titre illustratif et non restrictif, la Figure 5.21 illustre schématiquement des exemples de quelques cellules B stimulées par l'antigène temps et les signaux de danger libérés par les cellules affectées associées à l'opération 21, la gamme opératoire, et l'ordre de fabrication du produit P2. Le détail des propositions de ces cellules est donné dans les annexes correspondantes mentionnées sur la Figure 5.21.

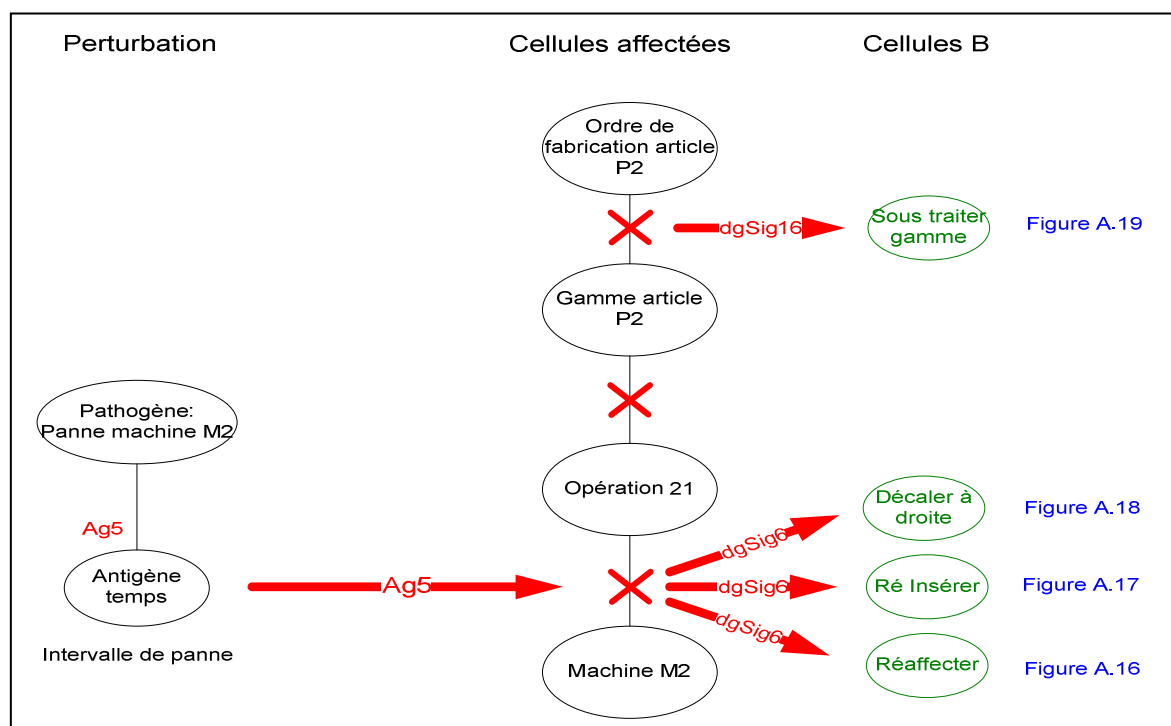


Figure 5.21: Illustration de quelques cellules B simples stimulées par l'antigène temps et des signaux de danger.

L'antigène (« Ag5 ») et le signal de danger (« dgSig6 ») stimulent les cellules B « réaffecter opération », « réinsérer opération » et « décaler opération à droite », dont les propositions sont illustrées respectivement dans les annexes A.16, A.17 et A.18.

Le rôle de la cellule B « *réaffecter opération* » est de chercher, dans les gammes opératoires de l'article fabriqué, des ressources équivalentes à celle tombée en panne et de proposer une réaffectation de l'opération bloquée vers une des ressources disponibles. Dans le cas général où plusieurs ressources équivalentes sont disponibles, cette proposition est trouvée en implémentant l'algorithme de réaffectation multicritère proposé par Ounnar et Ladet (1999) et basé sur la méthode AHP (« *Analytic Hierarchy Process* »). Comme dans cet exemple, seule la machine M3 est équivalente à la machine M2 perturbée, la cellule B réoriente l'opération 21 affectée vers cette machine tout en lui trouvant un intervalle d'exécution. La cellule B propose de supprimer l'ancien lien de spécification d'ordonnancement initial de l'opération et d'en créer un autre, comme l'illustre l'annexe A.16.

Le rôle de la cellule B « *réinsérer opération* » est de chercher un nouvel intervalle de temps pour exécuter, sur la même machine M2 perturbée, la totalité ou une partie de l'opération 21 affectée. Cette cellule implémente des heuristiques d'insertion proposées par Miyashita et Sycara (1995). Dans cet exemple, la cellule B insère une partie de l'opération 21 affectée dans l'intervalle de temps disponible sur la machine M2 avant le début de l'opération suivante (cf. Figure 5.1). Cette cellule propose alors de supprimer l'ancien lien de spécification d'ordonnancement initial et de créer un nouveau lien décrivant la partie de l'opération à insérer, comme l'illustre l'annexe A.17.

Le rôle de la cellule B « *décaler à droite* » est de décaler une opération affectée dans le temps de manière à accommoder la perturbation comme l'explique par exemple Abumaizar et Svestka (1997). La cellule B propose de supprimer l'ancien lien de spécification d'ordonnancement initial de l'opération et d'en créer un autre, comme l'illustre l'annexe A.18.

Le rôle de la cellule B « *sous traiter gamme* » est de chercher, dans les systèmes d'information ou en sollicitant les décideurs du service approvisionnement, des sous traitants capables de prendre en charge la fabrication de l'article. Si un tel sous traitant est trouvé, la cellule propose de supprimer l'ordre de fabrication, et de le remplacer par un ordre de sous-traitance, comme l'illustre l'annexe A.19. Cet ordre de sous-traitance est créé et lancé dans le système en tant que cellule artificielle ayant des spécifications de temps, de coût et de qualité. Cette cellule sera à son tour pilotée contre les perturbations.

Soulignons ici que l'approche immunitaire permet de remplacer les algorithmes existants par d'autres algorithmes plus performants, ou bien de rajouter d'autres types de cellules B associées à des algorithmes plus adaptés au système de production considéré sans modifier ou remettre en cause la structure. Cet aspect confère à l'approche une dimension de généricité par rapport aux décisions de pilotage, algorithmes et méthodes qui peuvent être utilisés.

5.5.3.2. Activation de cellules B composées

Parmi les cellules B composées stimulées par les antigènes et les signaux de danger, on peut distinguer par exemple les cellules « *subdiviser opération* » et « *substituer opération* » illustrées dans la Figure 5.22. Le détail des propositions de ces cellules est donné dans les annexes correspondantes mentionnées sur la Figure 5.22.

La cellule B « *subdiviser opération* » permet de gérer l'allocation d'une opération affectée à un ensemble de ressources disponibles. La durée et la quantité de l'opération affectée sont données par le signal de danger émis par la cellule associée à l'opération affectée. L'ensemble

des ressources disponibles est déterminé par les propositions des cellules B simples de réaffectation et de reséquencement. La cellule B « *subdiviser opération* » détermine alors parmi les ressources disponibles, quelles ressources choisir et quelle quantité allouer à chaque ressource. Pour ce faire, cette cellule B fait appel à l'algorithme de [Nof et Grant \(1991\)](#) qui permet de subdiviser un ordre en plusieurs ordres partiels.

La proposition de la cellule B « *subdiviser opération* » est détaillée dans [l'annexe A.20](#). Dans cette figure, nous remarquons que la cellule B est sensible :

- A l'antigène temps (« *Ag5* ») donnant la date de début, la date de fin et la durée de la perturbation « *panne machine M2* »
- Au signal de danger (« *dgSig6* ») émis par la cellule associée à l'opération 21 affectée
- A la proposition de la cellule B simple « *réinsérer opération* » permettant de trouver un nouvel intervalle de temps sur la machine perturbée M2 pour exécuter une partie ou la totalité de l'opération 21 affectée
- A la proposition de la cellule B simple « *réaffecter opération* » permettant de rediriger l'opération 21 affectée vers une ressource équivalente

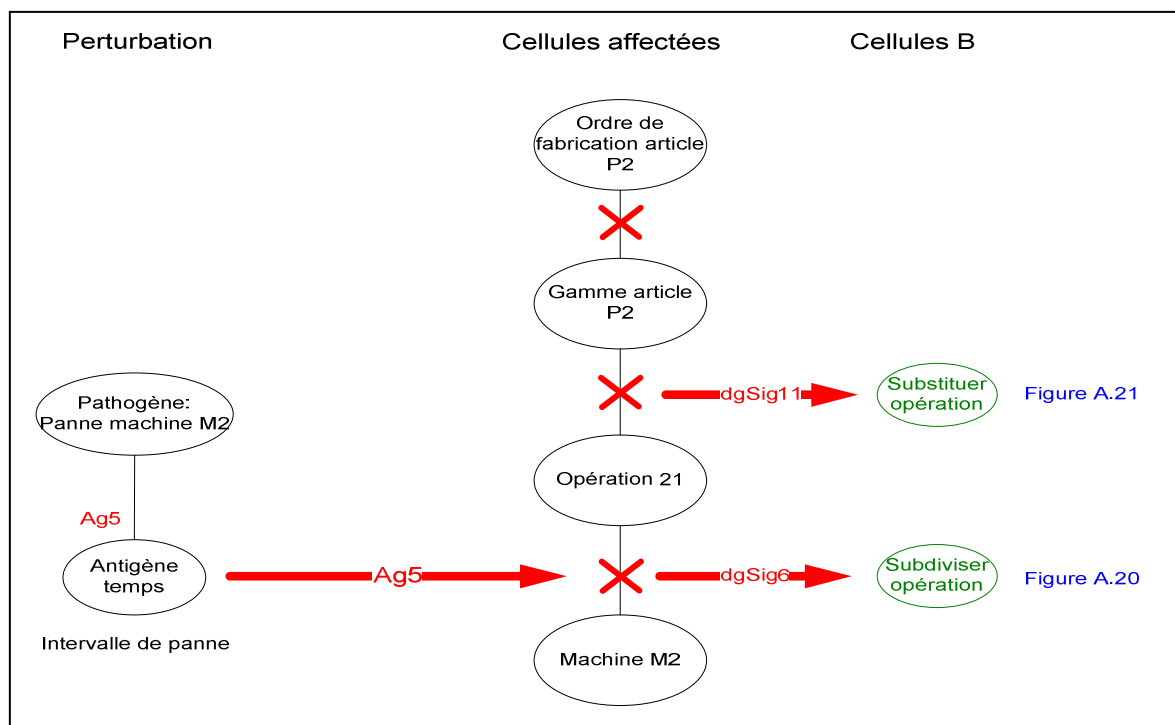


Figure 5.22: Illustration de quelques cellules B composées stimulées par l'antigène temps et des signaux de danger.

La cellule B « *subdiviser opération* » propose alors de supprimer le lien de spécification (« *PRR20* ») d'ordonnancement initial de l'opération 21 et de le remplacer par deux nouveaux liens de spécification de temps (« *PRR52* » et « *PRR54* »). Le lien (« *PRR52* ») permet de reséquencer une partie de l'opération 21 sur la même machine M2 après réparation. Le lien (« *PRR54* ») permet de rediriger la partie restante de l'opération 21 vers la machine M3 équivalente.

La cellule B « *substituer opération* », dont la proposition est illustrée en [annexe A.21](#), permet de chercher dans les gammes opératoires de l'article fabriqué P2, une opération équivalente à l'opération affectée. Dans cet exemple, l'opération O21 affectée correspond à une opération

automatisée qui peut être remplacée par une opération manuelle équivalente O23. Dans ce cas, la cellule B « *substituer opération* » propose de supprimer le lien de spécification (« *PRR30* ») liant la gamme opératoire de l'article P2 à l'opération O21 affectée, et de le remplacer par un nouveau lien de spécification (« *PRR40* ») qui va lier la gamme opératoire de l'article P2 à l'opération manuelle équivalente O23. La cellule B « *substituer opération* » sollicite la cellule B « *réaffecter opération* » pour fixer les dates de début et de fin de l'opération manuelle O23 dans l'emploi du temps de l'opérateur 4 qui va l'exécuter.

5.5.4. Aide à l'élaboration d'une réaction à la perturbation

Les antigènes, les signaux de danger ainsi que les propositions des cellules B et des éventuelles cellules mémoires sont perçus par une cellule Th. Comme dans le premier exemple de la défaillance du fournisseur, cette cellule est en charge de coordonner une réponse à la perturbation et à ses conséquences. Pour ce faire, cette cellule montre au chef d'atelier la perturbation (antigènes), ses conséquences (signaux de danger), et les actions de pilotage disponibles pour y réagir (propositions des cellules B et mémoire).

La cellule Th propose au chef d'atelier des réponses en affectant à chaque antigène et signal de danger une proposition d'une cellule B ou mémoire. Par contre, elle lui confie la responsabilité de sélectionner les réponses cohérentes et lui donne la possibilité de supprimer celles qui présentent des conflits ou des incohérences. La cellule Th permet de capturer les choix de ce décideur en tant que réponses immunitaires qui sont ensuite affinées en stimulant les cellules B. A ce stade, notre maquette permet aussi d'aider le chef d'atelier à évaluer la performance et les conséquences résiduelles de la perturbation pour chaque réponse capturée.

Lors de prochaines rencontres avec des perturbations identiques ou similaires, les réponses mémorisées peuvent être utilisées pour construire de nouvelles réponses.

5.6. Discussion

Les exemples présentés dans ce chapitre permettent d'illustrer le fonctionnement du système immunitaire artificiel pour le pilotage, et l'utilisation du modèle de connaissances. Il est cependant intéressant de revenir sur certains points de ce fonctionnement afin de les mettre en valeur.

Nous avons vu que les fonctions d'analyse des événements et de détection des perturbations sont réalisées par les cellules APC de l'immunité innée. En se basant sur le principe de discrimination Soi/non Soi et sur les deux concepts de PAMP et de PRR, ces cellules assurent la généralité de prise en compte d'une variété de types de perturbations. Nous avons illustré comment une variété d'événements peuvent être analysés et une multitude de perturbations peuvent être détectées et introduites dans le système sous forme de pathogènes artificiels. Par rapport aux systèmes MES existants, la possibilité de prendre en compte une variété de types de perturbations de manière générique représente une contribution importante. En effet, comme nous l'avons vu au premier chapitre, les systèmes actuels ne permettent de considérer qu'un nombre réduit de types de perturbations, et ce de manière très limitée.

La fonction d'identification des conséquences d'une perturbation peut être réalisée grâce aux concepts d'antigène et de danger. Il incombe aux cellules représentatives des activités et des entités du système de production de percevoir les antigènes et les signaux de danger afin de déterminer si elles sont affectées par les perturbations, et de quelle manière.

Du point de vue de la détection des perturbations et de l'identification de leurs conséquences, les exemples examinés montrent plusieurs aspects intéressants relatifs aux interactions des cellules du système immunitaire artificiel pour le pilotage avec d'autres outils plus spécifiquement dédiés au diagnostic, l'aide à la décision ou la gestion d'ateliers de production.

En effet, les exemples précédents illustrent la nécessité d'estimer certains attributs caractéristiques des perturbations comme par exemple leurs durées. Le système immunitaire artificiel pour le pilotage offre plusieurs possibilités pour y aboutir. Un premier moyen consiste à doter les cellules APC de capacités de communication leur permettant d'interagir avec des experts humains pour estimer les caractéristiques manquantes d'une perturbation. Cet expert peut alors directement renseigner les antigènes du pathogène créé.

Comme l'expertise humaine n'est pas toujours disponible, précise ou fiable, un deuxième moyen consiste à faire appel à l'ontologie elle-même pour jouer le rôle d'outil d'aide à l'estimation de ces attributs. Il est en effet possible de consulter l'historique des événements similaires que cette base de connaissances détient afin d'extrapoler des estimations des attributs d'une perturbation. Ici, la similitude entre événements est un problème qui peut ne pas être trivial. En effet cette similitude peut être définie non seulement par le type d'événement ayant conduit à la détection de la perturbation, mais aussi par les conséquences de cette perturbation et les types de décision qui peuvent être prises. Ceci donne une ouverture directe de notre approche sur des méthodes de type raisonnement à partir de cas (« *Case Based Reasoning, CBR* ») qui peuvent aider à détecter mais aussi à réagir à la perturbation.

Le troisième moyen consiste à interconnecter le système immunitaire artificiel pour le pilotage à des outils externes de diagnostic et/ou d'aide à la décision, comme des outils de GMAO ou de GQAO par exemple. Comme ces outils sont plus spécialisés, ils peuvent apporter des réponses plus précises aux problèmes d'estimation.

Nous avons vu que pour déterminer les conséquences d'une perturbation, chaque cellule doit vérifier ses liens de spécification, déterminer si ces liens sont affectés ou non, et être en mesure d'évaluer les conséquences résiduelles après réponse. Ici, il est important de remarquer que les procédures de vérification des liens de spécification et d'évaluation des conséquences résiduelles sont spécifiques au système de production considéré.

En effet, du moment que l'on admet que tout système de production est assujéti à des exigences de performance et des contraintes techniques (comme par exemple des contraintes de sécurité, de qualité, de conception et de réalisation des produits, etc.), l'idée de recourir à des liens de spécification pour saisir ces exigences et ces contraintes est générique. Par contre, trois aspects sont spécifiques à chaque système de production considéré : d'abord les procédures qui permettent de vérifier si oui ou non une spécification est perturbée, ensuite les seuils ou niveaux à partir desquels on peut estimer qu'une spécification est perturbée, enfin les procédures permettant d'évaluer les conséquences résiduelles après réaction à la perturbation.

Dans la maquette que nous avons développée, nous avons eu recours à de simples règles et procédures de vérification qui permettent d'identifier le danger et de le propager. Nous avons impliqué le décideur pour évaluer les conséquences résiduelles des perturbations après réaction. Mais face à la réalité complexe des systèmes de production, des outils plus

performants et plus dédiés à cette problématique doivent être impliqués. On peut par exemple envisager de faire appel à des outils d'aide au diagnostic, des moteurs d'inférence et de raisonnement de type système expert, et à des méthodologies de type analyse des modes de défaillance (AMDEC).

Nous tenons néanmoins à souligner que, par rapport aux systèmes MES existants, la possibilité d'identifier une variété de conséquences d'une perturbation sur le système de production représente une contribution importante. En effet, le plus souvent, les systèmes MES actuels ne considèrent que les conséquences d'un nombre réduit de types de perturbations, et ce uniquement sur les ordonnancements établis. Dans l'approche immunitaire, la théorie du danger offre potentiellement l'opportunité d'identifier une variété de types de dangers et de conséquences d'une perturbation sur un système de production. Nous convenons toutefois que ce point nécessite des recherches supplémentaires.

Les concepts d'antigènes et de signaux de danger servent à déterminer des actions de pilotage compétentes pour intervenir sur une perturbation. Ces actions de pilotage relèvent de la responsabilité des cellules B. Nous avons vu que ces cellules peuvent être associées à des algorithmes existants de la littérature. En fonction des besoins, ces algorithmes peuvent être modifiés, adaptés, mis à jour ou remplacés par d'autres algorithmes plus performants. L'approche immunitaire permet d'ajouter des algorithmes sans fondamentalement remettre en cause la structure. En conséquence, les cellules B représentent une boîte à outils modulaire, facilement extensible et personnalisable en fonction du système de production considéré. Les recommandations et les propositions des cellules B peuvent aussi être mises en correspondance ou provenir d'approches ou de méthodologies de type plans qualité, plans d'actions ou plans de prévention des risques.

La possibilité d'intégrer plusieurs outils, méthodes et algorithmes de pilotage confèrent au système immunitaire artificiel une généricité et une flexibilité par rapport aux types de décisions de pilotage qui peuvent être mises en œuvre. Par contre, chaque outil, méthode ou algorithme en soi est spécifique au système de production considéré. Dans ce sens, les cellules B offrent le moyen d'interfacer ces outils, méthodes et algorithmes afin de tirer le meilleur profit de leurs propositions lors de la construction de réponses immunitaires. Cette étape d'interfaçage peut nécessiter des développements et des adaptations spécifiques en fonction du système de production considéré.

Enfin, dans ce chapitre, nous avons vu l'intérêt de recourir à des cellules Th pour aider le décideur à construire des réponses immunitaires cohérentes à partir des propositions des cellules B et mémoire. Les cellules Th permettent de capturer l'expertise du décideur humain lorsqu'il construit une réponse à une perturbation. Cette expertise est mémorisée et peut être réutilisée lors de futures rencontres avec des perturbations similaires ou identiques. La capitalisation de l'expertise sur les perturbations permet d'enrichir les capacités des systèmes MES existants, qui à notre connaissance ne justifient pas d'une telle fonction. Mais pour être capable d'automatiser entièrement le fonctionnement de ces cellules Th, nous sommes conscients que des efforts de recherche plus importants sont nécessaires. Dans ce sens, l'usage d'outils et de méthodes d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique, tel que l'apprentissage par renforcement par exemple, est envisageable.

5.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cherché à illustrer la pertinence des propositions issues de l'étude de l'immunité biologique pour le pilotage de systèmes de production soumis à des perturbations.

Pour ce faire, nous avons développé une maquette informatique composée d'une base de données, d'un système multi agent, et d'une ontologie. La base de données sert à simuler les systèmes d'information (ERP et MES) du système de production d'une entreprise manufacturière de taille moyenne, opérant dans le domaine de l'industrie mécanique (usinage et montage de pièces mécaniques). Le système multi agents implémente les cellules et les fonctions du système immunitaire artificiel pour le pilotage. L'ontologie représente une base de connaissances qui implémente le modèle de connaissances sur les perturbations, leurs conséquences et les réponses permettant d'y réagir.

Ce prototype logiciel permet d'illustrer que les concepts et les mécanismes proposés se prêtent bien à un développement informatique. Cette maquette montre non seulement la réalisabilité mais aussi la compatibilité des concepts et des mécanismes étudiés avec des paradigmes (systèmes multi agents) et des outils (systèmes à base de connaissances) existants. Cette maquette permet aussi de mettre en valeur la position médiatrice qu'occupe le système immunitaire artificiel pour le pilotage par rapport aux systèmes d'information. En effet, les agents associés aux cellules de ce système peuvent interfacer les systèmes de pilotage de l'entreprise (tels que le système ERP) et les systèmes de gestion d'atelier (tels que les systèmes MES, GMAO et GQAO) et permettent de tirer profit de leurs fonctionnalités en vue de traiter les perturbations.

Ce prototype logiciel nous a permis d'étudier quelques exemples de perturbations afin d'illustrer le fonctionnement des propositions issues de l'étude de l'immunité biologique. Nous nous sommes alors positionnés du point de vue de l'ontologie pour expliquer comment la base de connaissances peut jouer un rôle de support de communication et de travail pour les différents agents cellules, et comment elle permet d'acquérir des connaissances lors du traitement de perturbations afin de les réutiliser lorsque d'autres perturbations similaires ou identiques ont lieu.

Les exemples présentés permettent d'illustrer les fonctions de détection, d'identification des conséquences, de réaction et de mémorisation d'une variété de perturbations. Ces fonctions permettent de doter les systèmes MES actuels de fonctions spécifiquement dédiées à la gestion des perturbations, contribuant ainsi à accroître leur réactivité vis-à-vis des perturbations. Les exemples présentés permettent aussi d'illustrer le potentiel de généricité de l'approche, non seulement par rapport à une variété de types de perturbations, mais aussi par rapport aux décisions et actions de pilotage qui peuvent être intégrés pour y répondre.

Finalement, la discussion menée à la fin de ce chapitre nous permet de conclure que pour être pleinement automatisée et opérationnelle, l'approche nécessite d'approfondir le fonctionnement de certaines cellules (APC et Th), et d'adapter le fonctionnement de certaines autres cellules (B et mémoire) pour tenir compte des spécificités particulières à chaque système de production.

Conclusion générale et perspectives

Dans cette thèse, nous sommes partis du constat que face aux perturbations, et compte tenu de la complexité des systèmes de production modernes, la performance d'un système de pilotage se retrouve fortement tributaire de son aptitude à adapter les décisions déjà prises aux nouvelles circonstances du système de production.

Malgré le développement de systèmes d'information de type « *manufacturing execution system* » (MES) capables d'assurer un meilleur contrôle et suivi des activités de production, nous avons constaté que les possibilités offertes par de tels systèmes restent limitées quant à l'aide à la décision apportée et la capitalisation de l'expertise générée lors du traitement des perturbations.

En effet, dans le premier chapitre, nous avons étudié l'état de l'art des systèmes de pilotage, et plus particulièrement les travaux sur le pilotage de systèmes de production soumis à des perturbations. Bien que les approches existantes offrent plusieurs possibilités de prise en compte de perturbations, nous avons constaté que les propositions étudiées restent spécifiques par rapport à la nature des perturbations, et par rapport à la manière de les traiter. Prises individuellement, chaque approche peut être compatible avec des perturbations et non compatible avec d'autres. Nous avons constaté un manque de cadre conceptuel pour la modélisation des perturbations et de leurs conséquences. Nous avons aussi relevé l'absence d'une approche intégrée permettant à la fois la prise en compte, le traitement et la capitalisation de l'expertise générée et acquise suite au traitement des perturbations.

Dans ce contexte, l'immunité biologique se distingue par le fait qu'elle représente un système naturellement capable de réagir et de s'adapter à une grande variété de menaces biologiques qui guettent l'organisme hôte. Elle peut de ce fait inspirer et guider le développement de systèmes de pilotage capables de gérer efficacement et génériquement des perturbations.

Ainsi, nous nous sommes donnés pour problématique d'identifier les concepts, les principes et les mécanismes de l'immunité biologique qui peuvent être utilisés dans le développement de systèmes de pilotage ou récupérés pour enrichir les capacités des systèmes d'information et de décision existants face aux perturbations. L'objectif de notre travail consiste alors à montrer la validité et la pertinence de telles propositions pour le pilotage de systèmes de production.

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes penchés sur l'étude du fonctionnement de l'immunité biologique. Nous avons alors constaté que ce système naturel peut inspirer le développement de mécanismes assez génériques pour prendre en compte une variété de types de perturbations. L'immunité biologique peut guider le développement d'une architecture de pilotage distribuée. Cette architecture met en œuvre des composants inspirés des cellules immunitaires et dotés de fonctions spécifiquement dédiées à la gestion des perturbations – telles que les fonctions de détection, d'identification et de réaction aux perturbations. L'immunité biologique offre enfin des mécanismes permettant de distribuer ces fonctions sur les composants immunitaires tout en coordonnant leur fonctionnement.

Un tour d'horizon des approches qui ont développé des applications immunitaires artificielles nous a amené à constater d'abord que très peu de travaux adressent le domaine du pilotage de systèmes de production. Ensuite, les applications existantes s'apparentent trop à des approches telles que les algorithmes évolutionnistes. Enfin, les approches existantes ne mettent en œuvre qu'une partie des mécanismes immunitaires et ne profitent pas de la richesse et du cadre intégré qu'offre l'immunité biologique. De telles approches permettent par exemple d'optimiser des ordonnancements d'ateliers. Par contre, elles ne permettent ni de détecter des perturbations, ni d'identifier leur nature et leurs conséquences, ni enfin de réagir à ces perturbations.

Ces constatations nous ont incité à investiguer plus en détail le potentiel de l'immunité biologique. Dans le troisième chapitre, nous avons alors cherché à adapter les concepts, les principes et les mécanismes de l'immunité biologique aux systèmes de production.

Pour ce faire, nous avons proposé des analogies de structure et de mécanismes entre l'immunité biologique et le pilotage de systèmes de production. Ces analogies nous ont permis de définir un cadre conceptuel pour modéliser les perturbations de manière générique. Cette modélisation comporte une classification des perturbations, et la caractérisation des classes de perturbations. Cette classification permet de détecter la classe d'une perturbation à partir de l'acquisition d'événements qui sont analysés et trouvés anormaux. Par extension, le même cadre conceptuel intègre la détermination des conséquences des perturbations. A la fois détection des perturbations et identification de leurs conséquences reposent sur un nombre réduit de concepts immunitaires (antigènes et dangers) qui restent génériques en ce sens qu'ils sont applicables à une grande variété de perturbations et de conséquences.

Nous avons également pu proposer un cadre générique pour le traitement des perturbations. Ce cadre repose sur deux types de cellules (B et mémoire) qui représentent des actions de pilotage. Un troisième type de cellule (Th) joue le rôle de coordinateur entre ces cellules pour pouvoir proposer des réponses cohérentes.

Ensuite, dans le quatrième chapitre, nous avons adressé les questions de mise en œuvre informatique de nos propositions. Dans ce chapitre, nous avons montré que les contributions issues de l'étude de l'immunité biologique ne sont pas en concurrence, mais plutôt sont compatibles avec des paradigmes distribués existants, tels que le paradigme des systèmes multi agents. Nous avons alors adopté ce paradigme tout en le complétant avec les éléments issus de l'immunité biologique pour mettre en œuvre nos propositions.

Nous avons alors repris les analogies précédemment établies pour asseoir les éléments de l'architecture d'un système immunitaire artificiel pour le pilotage. Nous avons situé ce système par rapport aux systèmes d'information et par rapport aux décideurs. Cette architecture est distribuée. Elle repose sur des équivalents artificiels de quatre types de composants immunitaires : les pathogènes, les cellules de l'organisme, les cellules de l'immunité innée (APC) et enfin celles de l'immunité adaptative (B, mémoire et Th). Nous avons alors spécifié les responsabilités, les interactions et le comportement de chaque composant.

De plus, nous avons adressé la question de la modélisation des connaissances sur les perturbations. Nous avons montré que les ontologies sont un outil efficace pour mettre en œuvre directement les propositions issues de l'immunité biologique. En utilisant les ontologies, nous avons développé un modèle de connaissances qui permet d'atteindre trois

objectifs. D'abord il sert à formaliser la communication entre les agents du système. Ensuite, il représente une base de connaissances qui permet à chaque agent d'interpréter les stimuli de son environnement et de s'acquitter de ses responsabilités. Il permet enfin d'acquérir des connaissances lors du traitement de perturbations afin de les réutiliser lorsque d'autres perturbations similaires ou identiques ont lieu.

Finalement, le cinquième chapitre a présenté quelques exemples pour illustrer le potentiel de généralité de l'approche et l'exploitation du modèle de connaissances. Dans ce chapitre, nous avons développé une maquette informatique permettant de tester différents exemples de perturbations et d'illustrer les mécanismes de détection, d'identification des conséquences, de réaction et de mémorisation d'une variété de perturbations. Nous avons mis en valeur la position médiatrice qu'occupe le système immunitaire artificiel pour le pilotage par rapport aux systèmes d'information. Plus précisément, ce système se positionne entre les systèmes de pilotage d'entreprise (tels que l'ERP ou le SCM) et les systèmes de gestion d'atelier (tels que le MES, la GMAO, la GQAO, etc.) et permet de tirer profit et d'orienter leurs fonctionnalités en vue de traiter les perturbations. Enfin, nous avons illustré le rôle de l'ontologie comme support de communication et de capitalisation des connaissances.

Ce travail de recherche est un effort exploratoire qui a le mérite de proposer un cadre conceptuel intégré pour la prise en compte et la gestion de perturbations lors du pilotage de systèmes de production. Ce cadre conceptuel repose sur une structure unificatrice qui n'est pas en concurrence avec les paradigmes et les outils de gestion d'entreprise ou de pilotage d'atelier existants.

En effet, la structure proposée est compatible avec le paradigme des systèmes multi agents et permet de bénéficier des avantages de la distribution des fonctions et des décisions. Elle permet même d'étendre ce paradigme avec des concepts spécifiquement dédiés à la gestion des perturbations, tels que les concepts d'antigène (attributs caractéristiques d'une perturbation tels que durée, symptômes, ...), de danger (conséquences ou risques générés par une perturbation) et de présentation antigénique (propositions d'actions de pilotage).

L'architecture proposée s'intègre facilement dans le paysage des systèmes de gestion d'entreprise et de pilotage d'atelier. C'est une architecture complémentaire et compatible avec les systèmes d'information et de prise de décision existants. Elle permet de les compléter avec des fonctions spécifiquement dédiées à la gestion des perturbations, telles que les fonctions de détection, d'identification des conséquences, de réaction et de mémorisation des perturbations. Ces fonctions font actuellement défaut à l'offre commerciale existante.

Les concepts et les fonctions proposés sont assez génériques pour permettre la prise en compte et le traitement d'une variété de types de perturbations. Les cellules B artificielles sont associées à des actions de pilotage et correspondent à une boîte à outils diversifiés disponibles pour réagir aux perturbations. L'architecture est assez modulaire et extensible pour permettre le développement de nouvelles cellules ou la personnalisation de cellules existantes à des environnements particuliers. L'intégration de ces cellules est assurée par les cellules Th artificielles qui offrent des mécanismes de coordination entre les cellules B.

L'architecture proposée fait partie d'une approche « *immunitaire* » qui permet aux décideurs des systèmes de production de constituer une documentation rationnelle et générique sur les perturbations. Cette documentation permet aux décideurs de cerner les perturbations de leurs

systèmes de production et de renseigner les actions à prévoir en cas d'occurrence de telles perturbations.

Néanmoins, pour être pleinement opérationnelle, cette approche nécessite l'investigation et le développement d'une méthodologie permettant de spécifier et de renseigner exhaustivement chaque composant de l'architecture immunitaire en fonction du système de production considéré.

Des recherches supplémentaires sont tout aussi bien nécessaires pour améliorer certains points. Par exemple, il serait judicieux d'améliorer les capacités des cellules APC à détecter des perturbations, ainsi que les capacités des cellules associées aux entités du système de production à identifier les dangers et à déterminer les conséquences des perturbations. Ces capacités pourraient être améliorées par exemple en envisageant de les connecter à des systèmes plus spécifiques de diagnostic de la qualité, de la maintenance, etc. ou bien en ayant recours aux outils de l'intelligence artificielle.

Parmi ces outils, les systèmes à base de connaissances tels que les systèmes experts, les systèmes à base de règles, les moteurs d'inférence et de raisonnement – par ailleurs bien étudiés dans la littérature [Mouss, 2005] – fournissent une aide précieuse pour affiner le diagnostic des perturbations et mieux rendre compte de leurs conséquences.

Dans le cas de l'identification des dangers et des conséquences des perturbations sur un système de production, il serait très intéressant d'étudier l'apport et la manière de coupler ces outils d'intelligence artificielle avec des approches, des outils et des méthodologies du domaine de la fiabilité des systèmes, tels que l'approche AMDEC ou bien l'outil arbres de défaillances. Ceci devrait permettre d'étudier de manière plus approfondie, des mécanismes de danger plus sophistiqués. La mise en correspondance des dangers et des risques dans les systèmes de production devrait permettre de modéliser et de quantifier ces risques plus finement afin de tenir compte de manière plus exhaustive des conséquences des perturbations sur un système de production.

Il serait aussi intéressant d'approfondir le fonctionnement de certaines cellules telles que les cellules Th artificielles. Ces cellules sont en charge de coordonner les propositions des cellules mémoires et des cellules B artificielles associées à des actions de pilotage afin de construire des réponses aux perturbations. Pour ce faire, il serait judicieux de faire appel à des moteurs d'inférence et de raisonnement pour vérifier et assurer la cohérence des réponses en construction, ou bien à des méthodes d'apprentissage pour apprendre à générer de telles réponses.

De plus, le recours au raisonnement à partir de cas (« *Case Based Reasoning* ») est aussi envisageable. Ce type de raisonnement est utile pour rapprocher de nouvelles perturbations détectées avec des perturbations déjà rencontrées, pour identifier et anticiper les conséquences des perturbations et pour activer des cellules mémoires afin de restituer des réponses mémorisées.

Lorsque nous avons spécifié le comportement des agents de notre système immunitaire artificiel pour le pilotage, nous avons seulement donné une description de haut niveau qu'il serait judicieux de développer et d'approfondir. L'étude de l'immunité biologique peut contribuer à développer de nouveaux protocoles immunitaires d'interaction entre les agents ou

bien du moins, enrichir les protocoles existants. L'approfondissement de la théorie du réseau immunitaire nous semble une voie prometteuse dans ce sens.

Par ailleurs, du fait de son positionnement par rapport aux systèmes de gestion de l'entreprise et de pilotage d'atelier, notre travail soulève plusieurs questions relatives à l'interopérabilité entre les différents systèmes d'information et d'aide à la décision. Il faudrait en effet examiner plus en profondeur les problèmes d'interfaçage, d'échange et de communication qui peuvent survenir aux frontières du système immunitaire artificiel pour le pilotage, en l'occurrence lorsqu'il est interfacé avec d'autres systèmes tels que la GMAO, ou la GQAO.

Dans ce travail, nous avons cherché à déterminer le potentiel de l'immunité biologique pour le pilotage de systèmes de production qui implique des décisions à court terme. Il serait intéressant d'examiner les contributions de l'immunité biologique sur d'autres horizons de décision, par exemple sur le moyen et long terme, et à d'autres niveaux hiérarchiques comme le niveau de la planification ou la gestion de la chaîne logistique.

Enfin, en vue d'appliquer notre architecture à un système de production réel, il faudrait accorder une attention particulière et mener des recherches supplémentaires afin de tenir compte des contraintes de fonctionnement en temps réel des systèmes de production. Dans ce sens, la simulation apparaît comme un outil qui permet de tester le comportement du système avant une mise en œuvre réelle. Ainsi, on peut commencer par relier le système immunitaire artificiel pour le pilotage à une variété de modèles de simulation de systèmes de production. Ceci permet de tester et de valider l'approche et constitue une première étape vers une mise en œuvre réelle.

Bibliographie

- [Abumaizar et Svestka, 1997] Abumaizar R. J. and Svestka J. A., **Rescheduling job shops under random disruptions**. International Journal of Production Research, vol. 35, N. 7, pp. 2065 – 2082, 1997.
- [Achatz, et Parrish, 1987] Achatz R., Parrish D. J., **Host computer controls FMS at all levels**. The FMS Magazine 5, 1, pp. 21-25, 1987.
- [Andersson, 1997] N.Andersson, **On Modelling and Implementing Shopfloor Control Systems**. PhD thesis, Chalmers University of Technology, ISBN 91-7197-450-4, 1997.
- [Arentsen, 1995] Arentsen, A., **A Generic Architecture for Factory Activity Control**. PhD thesis, University of Twente, 1995, The Netherlands.
- [Aytug et al., 2005] Aytug H., Lawley M. A., McKay K., Mohan S., Uzsoy R., **Executing production schedules in the face of uncertainties : A review and some future directions**. European Journal of Operational Research, vol. 161, 2005, p. 86-110.
- [Babiceanu et al., 2004] Babiceanu R., Chen, F., Sturges, R., **Framework for the control of automated material handling systems using the holonic manufacturing approach**. International Journal of Production Research, vol. 42, n. 17, pp. 3551–3564, 2004.
- [Baillet, 1994] Baillet P., **Contribution à l'amélioration de la réactivité dans les systèmes de production notamment par la mise en œuvre des concepts de décentralisation des fonctions de décision**. Thèse de doctorat en sciences, Université d'Aix Marseille III, 1994.
- [Bajic et al., 2007] Bajic E. Y. Sallez, **Proposition de projet transversal exploratoire du GDR MACS : «Système Contrôlé par le Produit»**. Journées prospectives STP, Lyon, 11 & 12 juin, 2007.
- [Baker, 1991] Baker A.D., **Manufacturing control with a market-driven contract net**. PhD Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, NY, USA, 1991.
- [Bauer et al., 1991] Bauer, A., Bowden, R., Browne, J., Duggan, J., and Lyons, G., **Shop Floor Control Systems - From Design to Implementation**. Chapman & Hall, 1991.
- [Blanc et al., 2008] Blanc P., Demongodin I., Castagna P., **A holonic approach for manufacturing execution system design: An industrial application**. Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 21, pp. 315–330, 2008.
- [Bossidy et Charan, 2003] Bossidy L., Charan R., **Tout est dans l'exécution**. Paris, First Editions, ISBN 2-87691-734-3 (Br.), 2003.
- [Boulet et al., 1991] Boulet B., Chhabra B., Harhalakis G., Minis I., and Proth J. M., **Cell controllers : analysis and comparison of three major projects**. Computers in Industry, vol. 16, pp. 239-254, 1991.

- [Bourrières *et al.*, 2007] Bourrières J.P., Baptiste P., Bernard A., Lopez P., Morel G., Pierreval H., Portmann M.C., **Comité d'Experts en Productique : prospective de recherche**. 15 janvier 2007.
- [Bradley *et al.*, 2000] Bradley D.W., Tyrrell A.M., **Hardware Fault Tolerance: An Immunological Approach**. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp. 107 – 112, 2000.
- [Brennan *et al.*, 1997] Brennan R., Balasubramanian S., and Norrie D., **A Dynamic Control Architecture for Metamorphic Control of Advanced Manufacturing Systems**. In Gopaladrishnan, B., Murugesan, S., Struger, O., and Zeichen, G., editors, Proceedings of the International Symposium on Intelligent Systems and Advanced Manufacturing, pp. 213–223, 1997.
- [Bruccoleri *et al.*, 2003] Bruccoleri M., Amico M., Perrone G., **Distributed intelligent control of exceptions in reconfigurable manufacturing systems**. International Journal of Production Research, vol. 41, N. 7, pp. 1393–1412, 2003.
- [Bruckner *et al.*, 1998] Bruckner S., Wyns J., Peeters P., Kollingbaum M., **Designing agents for the manufacturing control**. In: Proceedings of Artificial Intelligence and Manufacturing Research Planning Workshop State of the Art & State of the Practice, pp. 40–46, 1998.
- [Brussel *et al.*, 1998] Brussel H. V., Wyns J., Valckernaers P., Bongaerts L., **Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA**. *Computers in Industry*, vol. 37, pp.255-274, 1998.
- [Bussmann *et al.*, 2001] Bussmann, S. and Schild, K., **An Agent-based Approach to the Control of Flexible Production Systems**. In Proceedings of 8th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, vol. 2, pp. 481–488, Antibes, France, 2001.
- [Carlos *et al.*, 2003] Carlos A. Coello Coello, Daniel Cortés Rivera and Nareli Cruz-Cortés, **Use of an Artificial Immune System for Job Shop Scheduling**. Second International Conference on Artificial Immune Systems (ICARIS-2003), Edimburgh, UK, 1-3 September, 2003.
- [Carlos *et al.*, 2004] Carlos A. Coello Coello, Daniel Cortés Rivera and Nareli Cruz-Cortés, **Job Shop Scheduling using the Clonal Selection Principle**. ACDM'2004, Springer, Bristol, U. K., April 2004.
- [Cauvin, 2005] Cauvin A., **Analyse, modélisation et amélioration de la réactivité des systèmes de décision dans les organisations industrielles**. Habilitation à diriger les recherches, Université Paul Cézanne Aix-Marseille III, 2005.
- [Chan *et al.*, 2005] Chan F.T.S., Swarnkar R. and Tiwari M.K., **Fuzzy goal – programming model with an artificial immune system (AIS) approach for a machine tool selection and operation allocation problem in a flexible manufacturing system**. International Journal of Production research, vol. 43, n. 19/1, pp. 4147 – 4163, October 2005.

- [Cheng *et al.*, 2006] Cheng F.-T., Chih-Feng Chang C.-F. and Wu S.-L., **Development of Holonic Manufacturing Execution Systems**. Manufacturing the Future, Concepts - Technologies – Visions, ISBN 3-86611-198-3, pp. 908, ARS/plV, Germany, July 2006, Edited by: Kordic, V.; Lazinica, A. & Merdan, M.
- [Chryssolouris *et al.*, 1984] Chryssolouris G., Wright K., Pierce J., Cobb W., **Decision Making on the Factory Floor: An Integrated Approach to Process Planning and Scheduling**. Robotics and Computer-Integrated manufacturing, vol.1, no. ¾, pp. 315-319, 1984.
- [Chryssolouris *et al.*, 1988] Chryssolouris G., Wright K., Pierce J., Cobb W., **Manufacturing Systems Operation: Dispatch Rules Versus Intelligent Control**. Robotics and Computer-Integrated manufacturing, vol. 4, no. ¾, pp. 531-544, 1988.
- [Colombo *et al.*, 2006] Colombo A., Schoop R., Neubert R., **An agent-based intelligent control platform for industrial holonic manufacturing systems**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, n. 1, pp. 322–337, 2006.
- [Colombo, 1998] Colombo, A.W., **Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems using High-level Petri nets**. Fertigungstechnik, Erlangen. Meisenbach Verlag, Bamberg, 1998.
- [Combacau *et al.*, 2000] Combacau M., Berruet P., Charbonnaud, Khatab A. and Zamai E., **Supervision and monitoring of production systems**. In Proceedings of 2nd Ifac/Ifip/IEEE Conference on Management and Control of Production and Logistics 2000 (McPl 2000), Grenoble, France, 5 – 8 July 2000.
- [Costa *et al.*, 2002] Costa A., Vargas P., Von Zuben F. and Franca P., **Makespan minimisation on parallel processors: an immune based approach**. In *Proceedings of the Special Session on Artificial Immune Systems in the 2002 Congress on Evolutionary Computing*, 2002.
- [Cui *et al.*, 2001] Cui X., Li M., and Fang T., **Study of population diversity of multi objective evolutionary algorithm based on immune and entropy principles**. Proc. of the IEEE congress on Evolutionary Computation, pp. 1316 – 1321, 2001.
- [Darmoul *et al.*, 2006] Darmoul S., Pierreval H., Gabouj S.H., **Scheduling using Artificial Immune System metaphors: A review**. IEEE International Conference on Service Systems and Service Management, Troyes, 25-27 Oct. 2006, France, p. 1150 – 1155.
- [Darmoul *et al.*, 2008] Darmoul S., Gabouj S.H., Pierreval H., **Integrating immunity features in a multi agent model**. Industrial Simulation Conference, ISC'2008, June 9 – 11, 2008, p. 31 – 34, Edited by Joel Colloc, Claude Petit and Claude Dussart, ISBN 978-90-77381-40-3, CESH, Université de Lyon, Lyon, France.
- [Dasgupta *et al.*, 1996] Dasgupta D. and Forrest S., **Novelty Detection in Time Series Data using Ideas from Immunology**. In ISCA 5th International Conference on Intelligent Systems, Reno, Nevada, June 19 – 21, 1996.
- [Dasgupta *et al.*, 1999] Dasgupta D. and Forrest S., **Artificial Immune Systems in Industrial Applications**. Proceedings of the International Conference on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials, N. 1, pp. 257 – 267, 1999.

- [De Castro et Timmis, 2002] De Castro L.N. and Timmis J.I., **Artificial immune systems: A new computational intelligence approach**. Springer – Verlag, Berlin, ISBN 1 - 85233 - 594 – 7, 2002.
- [De Castro et Von Zuben, 2002] De Castro L. N. and Von Zuben F. J., **Learning and optimization using the clonal selection principle**. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Special issue on Artificial Immune Systems, Vol. 6, No. 3, pp. 239 – 251, 2002.
- [De Castro, 2002] De Castro L. N., **Immune, Swarm and Evolutionary Algorithms: Part I – Basic models**. Proc. Of the ICONIP Conference (International Conference on Neural Information Processing), Workshop on Artificial Immune Systems, vol. 3, pp. 1464 – 1468, Singapura 18 – 22 November, 2002.
- [Denkena et al., 2002] Denkena B., Tonsho. H. K., Zwick M., and Woelk P., **Process Planning and Scheduling with Multi-agent Systems**. In Maryk, V., Camarinha-Matos, L., and Afsarmanesh, H., editors, Knowledge and Technology Integration in Production and Services: Balancing Knowledge and Technology in Product and Service Life Cycle, pp. 339–348, 2002.
- [Diltis et al., 1991] Diltis D., Boyd N., and Whorms H., **The Evolution of Control Architectures for Automated Manufacturing Systems**. Journal of Manufacturing Systems, vol. 10, N. 1, pp. 63–79, 1991.
- [Duffie et Piper, 1986] Duffie, N. A., and Piper, R. S., **Non-Hierarchical Control of Manufacturing Systems**. Journal of Manufacturing Systems, vol. 5, N. 2, pp. 137–139, 1986.
- [Duffie et Piper, 1987] Duffie, N. A., and Piper, R. S., **Non-hierarchical control of a flexible manufacturing cell**. Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, vol.3, no. 2, pp.175-179, 1987.
- [Duffie et Prabhu, 1994] Duffie N. A., and Prabhu V. V., **Real-time distributed scheduling of heterarchical manufacturing systems**. Journal of Manufacturing Systems, vol. 13, no. 2, pp. 94 –107, 1994.
- [Engin et Döyen, 2004] Engin O. and Döyen A., **A new approach to solve hybrid flow shop scheduling problems by artificial immune system**. Future Generation Computer Systems, vol. 20, pp. 1083 – 1095, 2004.
- [Feare, 2000] Feare T., **Pump up the volume**. Modern Materials Handling, Vol. 55, N. 3, pp. 55–59, 2000.
- [Ferber et al., 1998] Ferber J., Gutknecht O., **A meta model for the analysis and design of organizations in multi agent systems**. Proceedings of the 3rd ICMAS, p. 125 – 135, 1998.
- [Fletcher et al., 2003] Fletcher M., McFarlane D., Lucas A., Brusey J., and Jarvis D., **The Cambridge Packing Cell - A Holonic Enterprise Demonstrator**. In Maryk, V., Müller, J., and Pechoucek, M., editors, Multi-Agent Systems and Applications III, 3rd International/Central and Eastern European Conference on Multi-Agent Systems, volume 2691 of Lecture Notes in Artificial Intelligence, p. 533–543. Springer-Verlag, 2003.

- [Fletcher et Deen, 2001] Fletcher M., and Deen S. M., **Fault-tolerant holonic manufacturing systems**. Concurrency and Computation: Practice and Experience, Vol. 13, pp. 43–70, 2001.
- [Fukuda *et al.*, 1993] Fukuda T., Mori K. and Tsukiyama M., **Immune networks using genetic algorithm for adaptive production scheduling**. IFAC, 12th triennial world congress, Sydney, Australia, 1993.
- [Garrett, 2005] Garrett S.M., **How do we evaluate artificial immune systems?**. Evolutionary Computation, Vol. 13, N. 2, pp 145 – 178, 2005.
- [Gourc, 2006] Gourc D., **Vers un modèle général du risque pour le pilotage et la conduite des activités de biens et de services : propositions pour une conduite des projets et une gestion des risques intégrées**. Habilitation à diriger des recherches, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006.
- [Grabot et Geneste, 1994] Grabot B., Geneste L., **Un système expert gérant les informations vagues et incertaines pour l'aide à la décision en pilotage d'atelier**. Revue des systèmes de décision, vol. 3, n. 2, 1994.
- [Groover, 1987] Groover M., **Automation, Production Systems and CIM**. Prentice-Hall, 1987.
- [Gullander, 1999] Gullander, P., **On Reference Architectures for Development of Flexible Cell Control Systems**. PhD thesis, Chalmers University of Technology, Sweden, 1999.
- [Gwo *et al.*, 2004] Gwo Ching Liao, Ta Peng Tsao, **Application embedded chaos search immune genetic algorithm for short term unit commitment**. Electric Power Systems Research, Vol. 71, pp. 135 – 144, 2004.
- [Gwo *et al.*, 2006] Gwo Ching Liao, **Short term thermal generation scheduling using improved immune algorithm**. Electric Power Systems Research, Vol. 76, pp. 360 – 373, 2006.
- [Hadjimichael, 2004] Hadjimichael B., **Manufacturing Execution Systems Integration and Intelligence**. Master's Thesis, McGill University, 2004.
- [Hammer, 1987] Hammer H., **Flexible manufacturing cells and systems with computer intelligence**. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 3, pp. 39-54, 1987.
- [Hart *et al.*, 1998] Hart E., Ross P.M. and Nelson J., **Producing robust schedules via an artificial immune system**. Proceedings of International Conference on Evolutionary Computing, ICEC'98, IEEE Press, pp. 464-469, Anchorage, Alaska, 1998.
- [Hart et Ross, 1999] Hart E. and Ross P.M., **An Immune System Approach to Scheduling in Changing Environments**. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO-99, (W. Banzhaf, J. Daida, A.E. Eiben, M.H. Garzon, V. Honavar, M. Jakiela and R.E. Smith eds), pp1559-1565, Morgan Kaufmann, 1999.
- [Hofmeyr, 2000] Steven A. Hofmeyr, **An interpretative introduction to the immune system**. In *Design Principles for the Immune System and Other Distributed Autonomous Systems*, (Eds.). I. Cohen & L.A. Segel, Oxford University Press, 2000.

- [Horridge *et al.*, 2004] Horridge M., Knublauch H., Rector A., Stevens R., Wroe C., **A Practical Guide To Building OWL Ontologies Using The Protégé – OWL Plugin and CO-ODE Tools Edition 1.0**. The University of Manchester, August 27, 2004.
- [IEC, 2003] IEC (International Electrotechnical Commission), **Enterprise-control system integration, Part 1: Models and Terminology**. IEC 62264:2003 v1.0, ISBN: 0-580-45203-4, 2003.
- [ISA, 2000] ISA (The Instrumentation, Systems, and Automation Society), **American National Standard, Enterprise-Control System Integration, Part 1: Models and Terminology**. ANSI/ISA-95.00.01-2000, ISBN 1-55617-727-5, 2000.
- [Ishida, 1997] Ishida Y., **Active Diagnosis by Self Organisation: An Approach by the Immune Network Metaphor**. Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 1084 – 1089, 1997.
- [Ives et Vitale, 1988] Ives B., Vitale M.R., **After the sale: leveraging maintenance with information technology**. MIS Quarterly, Vol. 12, N. 1, pp. 7–21, 1988.
- [Jackson et Jones, 1987] Jackson R. H. F., Jones A.T., **An architecture for decision making in the factory of the future**. Interfaces, vol. 17, no. 6, pp. 15-28, 1987.
- [Jeemin *et al.*, 2000] Jeemin Hong, Wonsik Lee, Sunghan Lee, Beombee Lee and Youngdae Lee, **An efficient production planning algorithm for multi head surface mounting machines using the biological immune algorithm**. International Journal of Fuzzy Systems, Vol. 2, No. 1, March 2000.
- [Jerne, 1974] Jerne N.K., **Towards a network theory of the immune system**. Ann. Immunol. (Inst. Pasteur), Vol. 125C, pp. 373 – 389, 1974.
- [Jones et McLean, 1986] Jones A. T., McLean C. R., **A proposed hierarchical control model for automated manufacturing systems**. Journal of Manufacturing Systems, Vol. 5, N. 1, pp. 15-25, 1986.
- [Joshi *et al.*, 1995] Joshi S., Smith J., Wysk R., Peters B., and Pegden C., **Rapid-CIM: An Approach to Rapid Development of Control Software for FMS Control**. 27th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Ann Arbor, MI, May, 1995.
- [Kayama *et al.*, 1995] Kayama M., Sugita Y., Morooka Y., Fukuoka S., **Distributed Diagnosis System Combining the Immune Network and Learning Vector Quantization**. Proceedings of the 21st IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, pp. 1531 – 1536, Orlando, USA, 1995.
- [Kim, 2002] Kim B.I., **Intelligent Agent Based Planning, Scheduling and Control: Warehouse Management Application**. PhD Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, 2002.
- [King *et al.*, 2001] King R., Russ S. H., Lambert A. and Reese D., **An artificial immune system model for intelligent agents**. Future Generation Computer Systems, Vol. 17, pp. 335 – 343, 2001.

- [Koestler, 1969] Koestler, A., **The Ghost in the Machine**. Arkana Books, London, 1969.
- [Kondoh *et al.*, 1999] Kondoh S., Sato R. K., Umeda Y. and Tomiyama T., **Selforganization of the Cellular Manufacturing System**. The 32nd CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, pp. 595-603, 1999.
- [Kondoh *et al.*, 2000] Kondoh S., Umeda Y., Tomiyama T., **Morphological Design of a Manufacturing System based on the Concept of Cellular Machines**. The 33rd CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, pp. 66-70, 2000.
- [Krothapalli et Deshmukh, 1997] Krothapalli N., and Deshmukh A., **Effects of Negotiation Mechanisms on Performance of Agent-Based Manufacturing Systems**. Flexible Automation and Integrated Manufacturing, 1997.
- [Krothapalli et Deshmukh, 1998] Krothapalli N., and Deshmukh A., **Self-Regulating Negotiating Schemes for Robust Agent-Based Manufacturing Systems**. 7th Industrial Engineering Research Conference, Banff, Alberta, Canada, May, 1998.
- [Krothapalli et Deshmukh, 1999] Krothapalli N., Deshmukh. N. and A., **Design of negotiation protocols for multi-agent manufacturing systems**. International Journal of Production Research, vol. 37, no. 7, pp. 1601-1624, 1999.
- [Kubi, 2002] Kubi J., **Immunology**. 5th edition by Richard A. Goldsby, Thomas J. Kindt, Barbara A. Osborne, W.H. Freeman, 2002.
- [Kuivanen, 1996] Kuivanen R., **Disturbance Control in Flexible Manufacturing**. The International Journal of Human Factors in Engineering, vol. 6, n. 1, p. 41-56, 1996.
- [Kumar *et al.*, 2006] Kumar A., Prakash A., Shankar R., Tiwari M.K., **Psycho-Clonal algorithm based approach to solve continuous flow shop scheduling problem**. Expert Systems with Applications, Vol. 31, Issue 3, pp. 504-514, October 2006.
- [Le Moigne, 1990] Le Moigne J.L., **La théorie du système général : théorie de la modélisation**. 2ème édition, Paris, 1990.
- [Lee et Kim, 2008] Lee J.H., Kim C.O., **Multi agent systems applications in manufacturing systems and supply chain management: a review paper**. International Journal of Production Research, IJPR, vol. 46, N. 1, pp. 233 – 265, 2008.
- [Leitao *et al.*, 2008] Leitao P., Restivo F., **A holonic approach to dynamic manufacturing scheduling**. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 24, pp. 625–634, 2008.
- [Leitao et Barbosa, 2006] Leitao P., Barbosa J., **Disturbance Detection, Recover and Prediction in Holonic Manufacturing Control**. Proceedings of the IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems: Collective Intelligence and Its Applications, DIS 2006. June 15 – 16, Prague, Czech Republic, 2006.
- [Leitao, 2004] Paulo Jorge Pinto Leitao, **An Agile and Adaptive Holonic Architecture for Manufacturing Control**. PhD thesis, Faculty of Engineering of University of Porto, 2004.

- [Leitao, 2008] Leitao, P., **Agent-based distributed manufacturing control: A state of the art survey**. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2008, doi:10.1016/j.engappai.2008.09.005.
- [Lin et Solberg, 1991] Lin G.Y., Solberg J.J., **Effectiveness of flexible routing control**. International Journal on Flexible Manufacturing Systems, vol. 3, pp.189-211, 1991.
- [Lin et Solberg, 1992] Lin G.Y.-J., Solberg J.J., **Integrated shop floor control using autonomous agents**. IIE Transactions: Design and Manufacturing, vol. 24, N. 3, pp. 57–71, 1992.
- [Liu et al., 2000] Liu S., Gruver W.A., Kotak D., Bardi S., **Holonic manufacturing system for distributed control of automated guided vehicles**. In: Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, vol. 3, pp. 1727–1732, 2000.
- [Matson et McFarlane, 1998] Matson J., and McFarlane D., **Tools for Assessing the Responsiveness of Existing Production Operations**. In Proceedings of IEE Workshop, Responsiveness in Manufacturing, London, February, 1998.
- [Maturana et al., 1999] F. Maturana, W. Shen, et D. H. Norrie, « *MetaMorph: an adaptive agent-based architecture for intelligent manufacturing* », *International Journal of Production Research*, vol. 37, no. 10, 2159-2173, 1999.
- [Maturana et al., 2004] Maturana, F., Staron, R., Hall, K., Tichy, P., Slechta, P., Marý'k, V., **An intelligent agent validation architecture for distributed manufacturing organizations**. In: Camarinha-Matos, L. (Ed.), *Emerging Solutions for Future Manufacturing Systems*. Springer, Berlin, pp. 81–90, 2004.
- [Matzinger, 1998] Matzinger P., **An innate sense of danger**. *Seminars in Immunology*, vol. 10, pp. 399 – 415, 1998.
- [McFarlane et al., 1995] McFarlane D., Marett B., Elsley G., Jarvis D., **Application of holonic methodologies to problem diagnosis in steel rod mill**. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 1, pp. 940–945, 1995.
- [McFarlane et al., 2002] McFarlane D., Sarma S., Chirn J.L., Ashton K., **The intelligent product in manufacturing control and management**. 15th Triennial IFAC World Congress, Barcelone, Espagne, 2002.
- [McFarlane et al., 2003] McFarlane D., Sarma S., Chirn J.L., Wong C.Y., Ashton K., **Auto id systems and intelligent manufacturing control**. Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 16, N. 4, pp. 365 – 376, 2003.
- [Melnik et al., 1987] Melnik S.A., Carter P.L., **Production activity control**. The Business ONE, Irwin/APICS Series in Production Management, Richard D. Irwin Inc, (1987).
- [MESA, 1995] MESA International, **Controls Definition and MES to Controls Data Flow Possibilities**. White Paper, no. 3, 1995.
- [MESA, 1997] MESA International, **MES Explained: A High Level Vision**. MESA International, White Paper no. 6, 1997.

- [Meyer *et al.*, 2009] Meyer G.G., Främling K., Holmström J., **Intelligent Products: A survey.** Computers in Industry, Vol. 60, pp. 137–148, 2009.
- [Miyashita *et al.*, 1995] Miyashita K. and Sycara K., **CABINS: A Framework of Knowledge Acquisition and Iterative Revision for Schedule Improvement and Reactive Repair.** Journal of Artificial Intelligence, vol. 76, pp. 377 – 426, 1995.
- [Moalla, 2004] Moalla N., **Approche Méthodologique Pour Le Pilotage De La Performance Dans Une Chaîne Logistique.** Mémoire du Diplôme d’Etudes Approfondies (DEA), Université de Rouen, 2004.
- [Monch *et al.*, 2003] Monch L., Stehli M., Zimmermann J., **FABMAS: an agent-based system for production control of semiconductor manufacturing process.** In: Marýk, V., McFarlane, D., Valckenaers, P. (Eds.), *Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing. Lecture Notes in Artificial Intelligence*, vol. 2744. Springer, Heidelberg, pp. 258–267, 2003.
- [Monostori *et al.*, 1998] Monostori L., Szelke E., Kadar B., **Management of changes and disturbances in manufacturing systems.** Annual Reviews in Control, vol. 22, p. 85-97, 1998.
- [Mori *et al.*, 1994a] Mori K., Tsukiyama M. and Fukuda T., **Immune Algorithm and Its Application to Factory Load Dispatching Planning.** In *Proc. Japan-USA Symposium on Flexible Automation*, pp. 1343 – 1346, 1994.
- [Mori *et al.*, 1994b] Mori K., Tsukiyama M. and Fukuda T., **Load dispatch planning by immune algorithm with diversity and learning.** In *Proceedings of the 7th International Conference on Systems Research, Informatics and Cybernetics*, Vol. 2, pp. 136 – 141, 1994.
- [Mori *et al.*, 1998] Mori K., Tsukiyama M. and Fukuda T., **Adaptive scheduling system inspired by immune system.** In *Proceedings of the IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 3833 – 3837, 1998.
- [Mouss, 2005] Mouss M.D., **Diagnostic et conduite des systèmes de production par approche à base de connaissances.** Doctorat d’Etat es Sciences, Université Batna, 2005.
- [Nikraz *et al.*, 2006] Nikraz M. Caire G. and Bahri P. A., **A methodology for the analysis and design of multi-agent systems using JADE.** International Journal of Computer Systems Science and Engineering, 2006.
- [Nof *et al.*, 1991] Nof S. Y. and Grant F. H., **Adaptive/predictive scheduling: review and a general framework.** Production Planning & Control, vol. 2, N. 4, pp. 298-312, 1991.
- [Odrey *et al.*, 2003] Odrey N.G., Mejia G., **A re-configurable multi-agent system architecture for error recovery in production systems.** Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 19, pp. 35–43, 2003.
- [Onori, 1996] Onori M., **The Robot Motion Module: A Task-oriented Robot Programming System for FAA Cells.** PhD thesis, Department of Manufacturing Systems, The Royal Institute of Technology, 1996, Sweden.

- [Ottaway et Burns, 2000] Ottaway T. A., and Burns J. R., **An adaptive production control system utilizing agent technology**. International Journal of Production Research, vol. 38, no.4, pp. 721-737, 2000.
- [Ounnar et Ladet, 1999] Ounnar F, Ladet P., **Managing breakdowns machines: A Petri Nets model and a decision-making process**. European Journal of Automation, Modelling of reactive systems, vol. 33, N. 8 – 9, pp. 977 – 994, 1999.
- [PABADIS, 2002] PABADIS, **Revolutionising Plant Automation, The PABADIS Approach**. Work Package 6, Task 6.3. 2002.
- [Parunak et al., 1998] Parunak H.V.D., Baker A., Clark S., **The AARIA agent architecture: From manufacturing requirements to agent-based system design**. In: Working Notes of the ABM Workshop, Minneapolis, MN, pp. 136–145, 1998.
- [Parunak, 1987] Parunak H.V.D., **Manufacturing experience with the contract net**. In: M.N. Huhns (Ed.), Distributed Artificial Intelligence, Pitman, pp. 285–310, 1987.
- [Parunak, 1996] Parunak H.V.D., **Applications Of Distributed Artificial Intelligence In Industry**. In Foundations of Distributed Artificial intelligence, Chapter 4, pp. 139 – 164, G.M.P. O'Hare et N.R. Jennings editors, J. Wiley and Sons Inc, 1996.
- [Peeters et al., 1999] Peeters, P., Valckenaers, P., Wyns, J., and Brueckner, S., **Manufacturing Control Algorithm and Architecture**. In Proceedings of the Second International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, pages 877–888, Leuven, Belgium, 1999.
- [Pels et al., 1997] Pels H.J., Wortmann J.C., Zwegers A.J.R., **Flexibility in manufacturing: an architectural point of view**. Computers in Industry, vol. 33, pp. 271-283, 1997.
- [Pétin et al., 2007] Pétin J.-F., Gouyon D. et Morel G., **Supervisory synthesis for product-driven automation and its application to a flexible assembly cell**. Control Engineering Practice, Vol. 15, N. 5, pp. 595-614, 2007.
- [Protégé, 2000] The Protégé Project. <http://protege.stanford.edu>
- [Pujo et al., 2002a] Pujo P., Kieffer J.P., (sous la direction de), **Fondements du pilotage des systèmes de production**. Hermès Science Publications, Paris, 2002.
- [Pujo et al., 2002b] Pujo P., Kieffer J.P., (sous la direction de), **Méthodes du pilotage des systèmes de production**. Hermès Science Publications, Paris, 2002.
- [Quintas et Leitao, 1997] Quintas, A. and Leitao, P., **A Manufacturing Cell Controller Architecture**. In Sullivan, W. G. and Ahmad, M. M., editors, Proceedings of the Flexible Automation and Intelligent Manufacturing Conference, pp. 483–493, Middlesbrough, England. Begell House Inc, 1997.
- [Ruis – Torres et Mahmoodi, 2006] Ruiz –Torres A. J., Mahmoodi F., **A supplier allocation model considering delivery failure, maintenance and supplier cycle costs**. International Journal of Production Economics, N. 103, pp. 755–766, 2006.

- [Russ *et al.*, 1999] Russ S. H., Lambert A., King R., Rajan R. and Reese D., **An artificial immune system model for task allocation**. In *Proceedings of the Symposium on High Performance Distributed Computing*, 1999.
- [Saad *et al.*, 1997] Saad A., Kawamura K., Biswas G., **Performance evaluation of contract net-based heterarchical scheduling for flexible manufacturing systems**. *Intelligent Automation and Soft Computing*, vol. 3, n. 3, pp. 229 – 248, 1997.
- [Saad et Gindy, 1998] Saad S.M., and Gindy N.N., **Handling internal and external disturbances in responsive manufacturing environments**. *Production Planning and Control*, vol. 9, n. 8, pp. 760 – 770, 1998.
- [Saenz de Ugarte *et al.*, 2009] Saenz de Ugarte B., Artiba A., and Pellerin R., **Manufacturing Execution System – A Literature Review**. *Production Planning and Control*, Vol. 20, N. 6, pp. 525 – 539, September 2009.
- [Sallez *et al.*, 2009] Sallez Y., Berger T., Trentesaux D., **A stigmergic approach for dynamic routing of active products in FMS**. *Computers in Industry*, Vol. 60, pp. 204–216, 2009.
- [Scherer, 1998] Scherer E., **The Reliability of Shop Floor Control - Approaches to Systems innovation**. *Shop Floor Control - A Systems Perspective*. E. Scherer. Zurich, Springer-Verlag: 3-26, 1998.
- [Schild et Bussmann, 2007] Schild, K., Bussmann, S., **Self-organization in manufacturing operations**. *Communications of the ACM*, vol. 50, n. 12, pp. 74–79, 2007.
- [Senehi *et al.*, 1994] Senehi M.K., Kramer T.R., Ray S.R., Quintero R., Albus J.S., **Hierarchical control architectures from shop level to end effectors**. *Computer control of flexible manufacturing systems*, Eds. S.B. Joshi and J.S. Smith, Chapman & Hall, 1994.
- [Shaw, 1988] Shaw M.J., **Dynamic scheduling in cellular manufacturing systems: a framework for networked decision making**. *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 7, N. 2, pp. 83–94, 1988.
- [Shen *et al.*, 1998] Shen W., Xue D., and Norrie D. H., **An agent-based manufacturing enterprise infrastructure for distributed integrated intelligent manufacturing systems**. In *Proc. PAAM'98*, London, UK, pp. 533-548. 1998.
- [Shen *et al.*, 2001] Shen W., Norrie D.H., Barthès J.-P., **Multi-Agent Systems for Concurrent Intelligent Design and Manufacturing**. Taylor and Francis, London, UK, 2001.
- [Shen *et al.*, 2006] Shen W., Hao Q., Yoon H.J., Norrie D.H., **Applications of agent based systems in intelligent manufacturing: An updated review**. *Advanced Engineering Informatics*, vol. 20, pp. 415 – 431, 2006.
- [Takeshi et Ryohei, 1997] Takeshi Yamada and Ryohei Nakano, **Job-shop scheduling**. In A.M.S. Zalzala and P.J. Fleming, editors, *Genetic Algorithms in Engineering Systems*, IEE control engineering series, chapter 7, pp. 134–160. The Institution of Electrical Engineers, 1997.

- [Tambe, 1998] Tambe M., **Implementing Agent Teams in Dynamic Multi Agent Environments**. In *Applied Artificial Intelligence*, vol. 12, 1998.
- [Tawegoum *et al.*, 1994] Tawegoum R., Castelain E., and Gentina J.C., **Hierarchical and dynamic production control in flexible manufacturing systems**. *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 11, no. 4, pp. 327-334, 1994.
- [Teunis *et al.*, 1998] Teunis, G., Leit˜ao, P., and Madden, M., **A New Architecture for Flexible Shop Control Systems**. In *Proceedings of Integration in Manufacturing Conference*, pp. 699–709, Gotengorg, Sweden, 1998.
- [Timmis *et al.*, 2002] Timmis J., Edmonds C. and Kelsey J., **Assessing the performance of two immune inspired algorithms and a hybrid genetic algorithm for function optimization**. *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation 1*, pp. 1044–1051, 2004.
- [Titly, 1979] Titly A., **Analyse et Commande des Systèmes Complexes**. Cépaduès, 1979.
- [Tomiya, 1997] Tomiyama T., **A Manufacturing Paradigm Toward the 21st Century**. *Integrated Computer Aided Engineering*, vol. 4, n° 3, pp. 159-178, 1997.
- [Tranvouez, 2001] Tranvouez E., **IAD et ordonnancement : une approche coopérative du ré ordonnancement par systèmes multi agents**. Thèse de Doctorat en Sciences, Université d'Aix Marseille III, mai 2001.
- [Trentesaux, 2009] Trentesaux D., **Distributed control of production systems**. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 22, pp. 971–978, 2009.
- [Trovinger et Bohn, 2005] Trovinger S.C., Bohn R., **Setup time reduction for electronics assembly: combining simple (smed) and it-based methods**. *Production and Operations Management*, Vol. 14, N. 2, pp. 205–217, 2005.
- [Tseng *et al.*, 1997] Tseng M.M., Lei M., Su C., **A collaborative control system for mass customization manufacturing**. *Annals CIRP*, vol. 46, N. 1, pp. 373–376, 1997.
- [Usher et Wang, 2000] J.M. Usher et Y-C. Wang, **Judging the Value of Additional Information on the Performance of Intelligent Agents in Manufacturing Control**. *Conference on Intelligent Systems in Design and Manufacturing II*, SPIE, Boston, MA. 2000.
- [Uschold and Gruninger, 1996] Uschold M., Gruninger M., **Ontologies: Principles, Methods and Applications**. *Knowledge Engineering Review*, volume 11, N. 2, June 1996.
- [Valckenaers *et al.*, 1999] Valckenaers, P., Heikkilä, T., Baumgaertel, H., McFarlane, D., and Courtois, J., **Towards a Novel Manufacturing Control Principle**. In *Proceedings of the Second International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*, pages 871–875, Leuven, Belgium, 1999.
- [Vieira *et al.*, 2003] Vieira G.E., Hermann J.W., Lin E., **Rescheduling manufacturing systems: a framework of strategies, policies and methods**. *Journal of scheduling*, vol. 6, n. 1, p. 35 – 58, 2003.

[Zandieh *et al.*, 2006] Zandieh M., Fatemi Ghomi S.M.T., Moattar Hussein S.M., **An immune algorithm approach to hybrid flow shops scheduling with sequence dependant setup times**. Applied Mathematics and Computation, No. 180 pp. 111–127, 2006.

Annexes

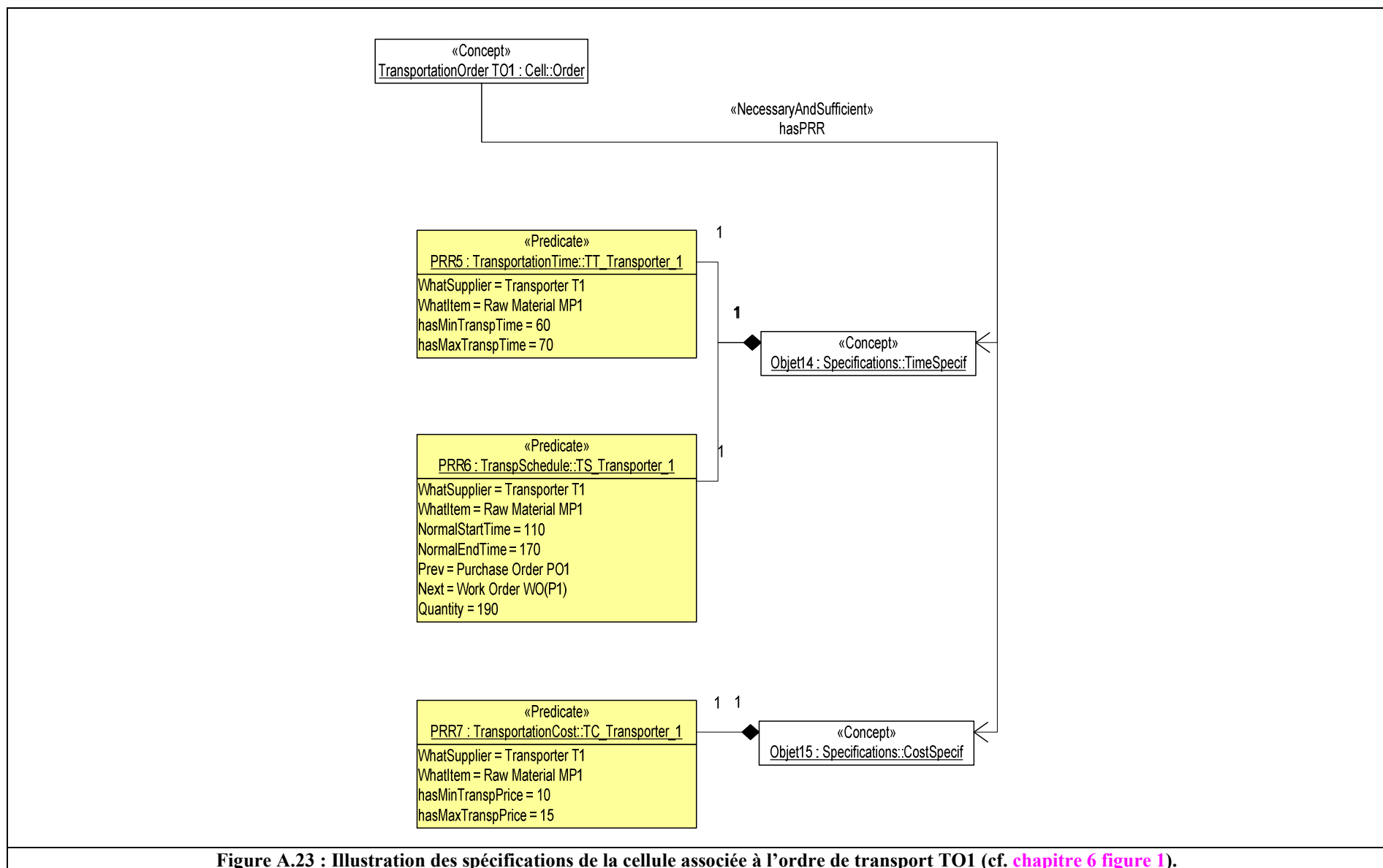


Figure A.23 : Illustration des spécifications de la cellule associée à l'ordre de transport TO1 (cf. chapitre 6 figure 1).

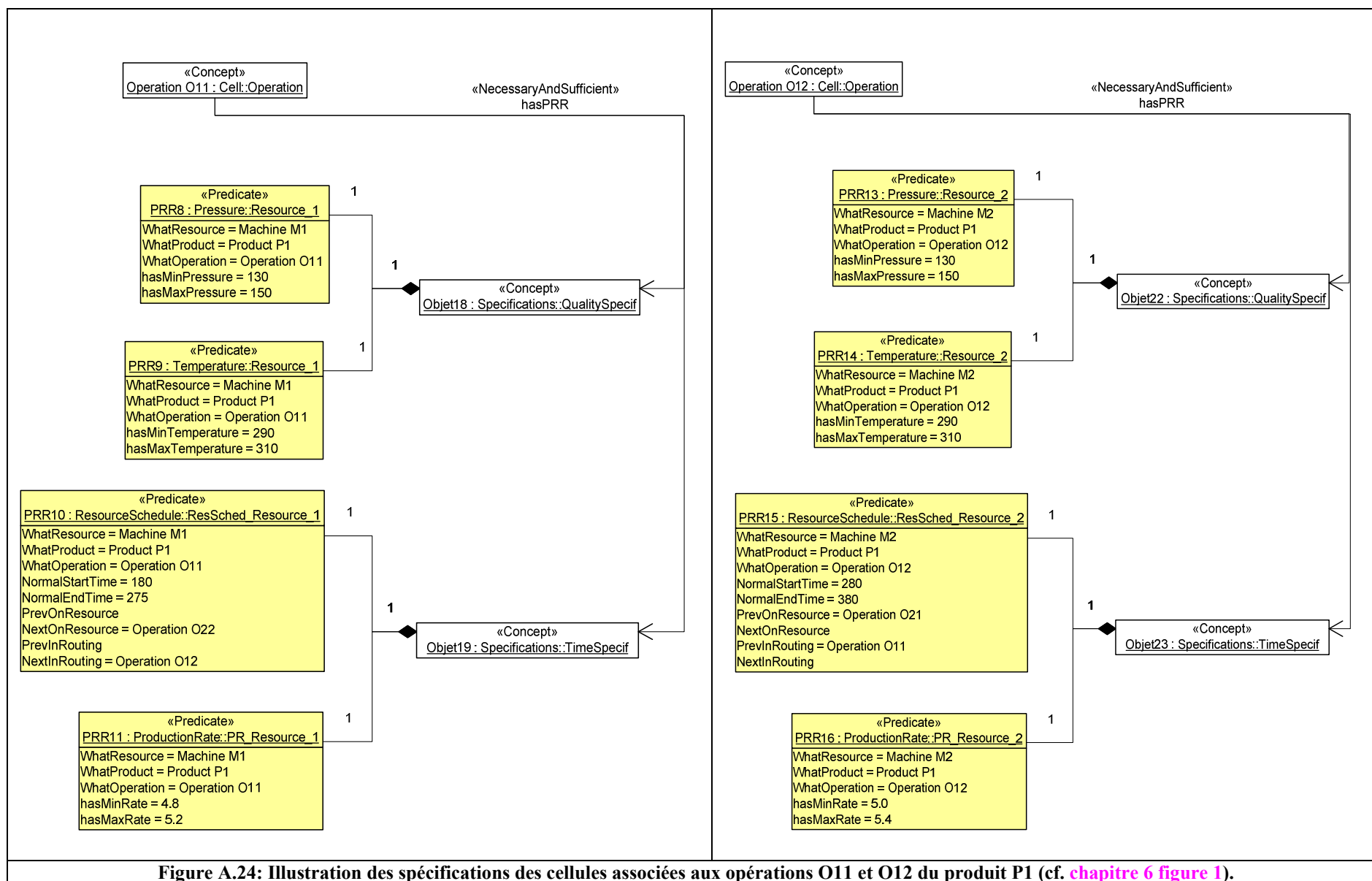


Figure A.24: Illustration des spécifications des cellules associées aux opérations O11 et O12 du produit P1 (cf. chapitre 6 figure 1).

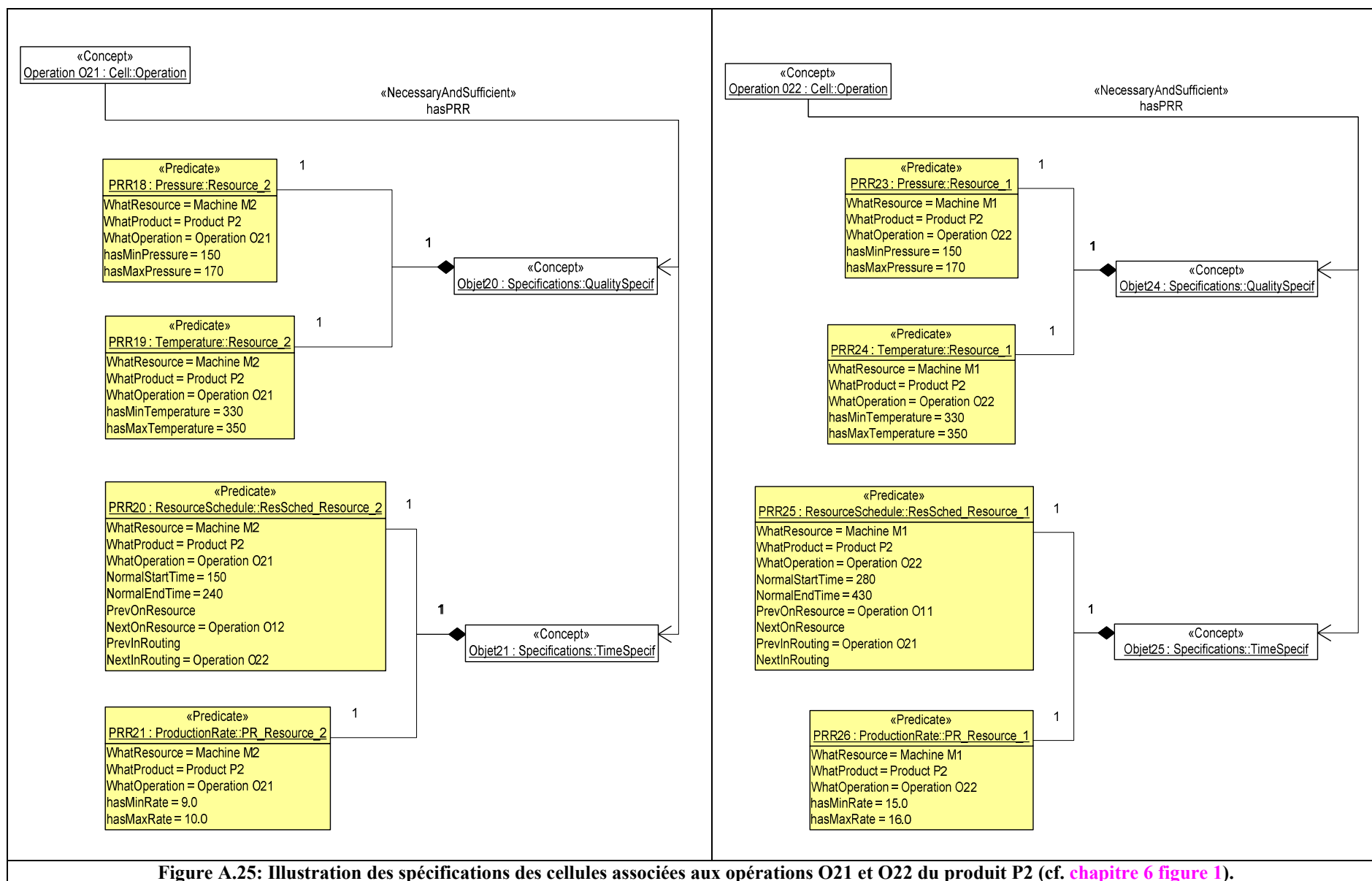


Figure A.25: Illustration des spécifications des cellules associées aux opérations O21 et O22 du produit P2 (cf. chapitre 6 figure 1).

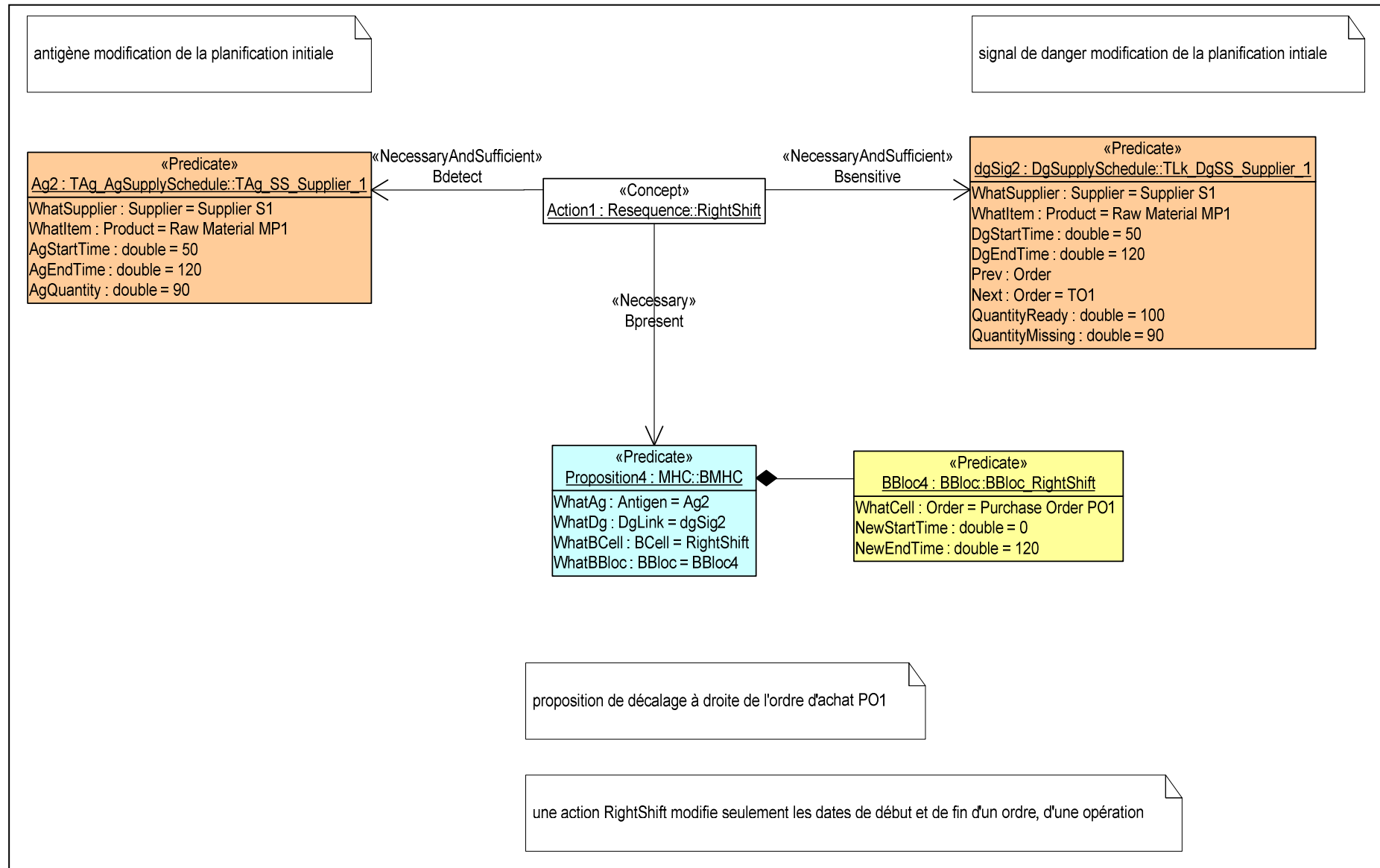


Figure A.26: Illustration de la proposition de l'action de pilotage "décaler à droite" appliquée à l'ordre d'achat PO1 (cf. [chapitre 6 section 6.3.3.1](#)).

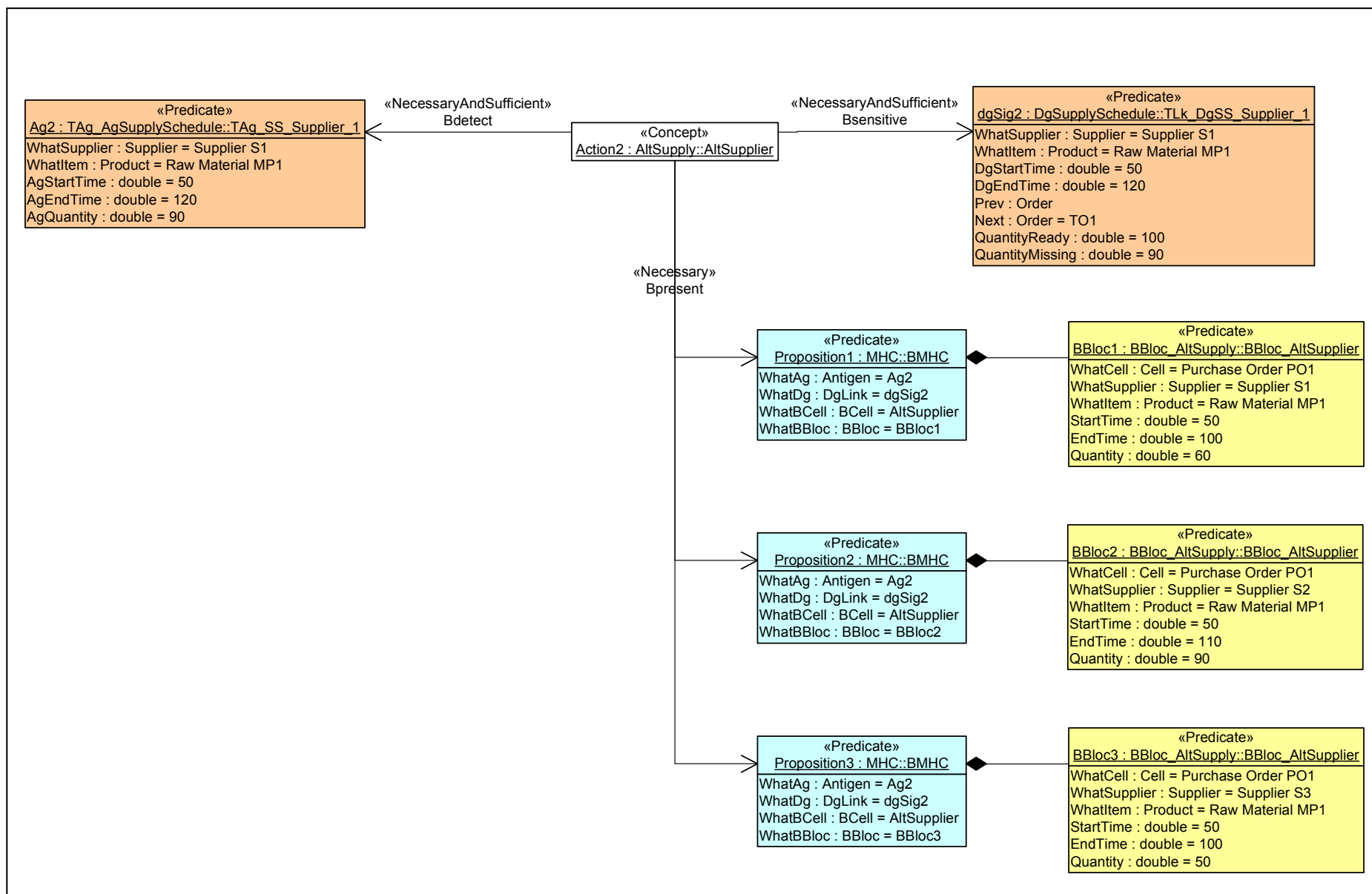


Figure A.27: Illustration des propositions de l'action de pilotage "trouver un fournisseur de substitution" appliquée à l'ordre d'achat PO1 (cf. [chapitre 6 section 6.3.3.1](#)).

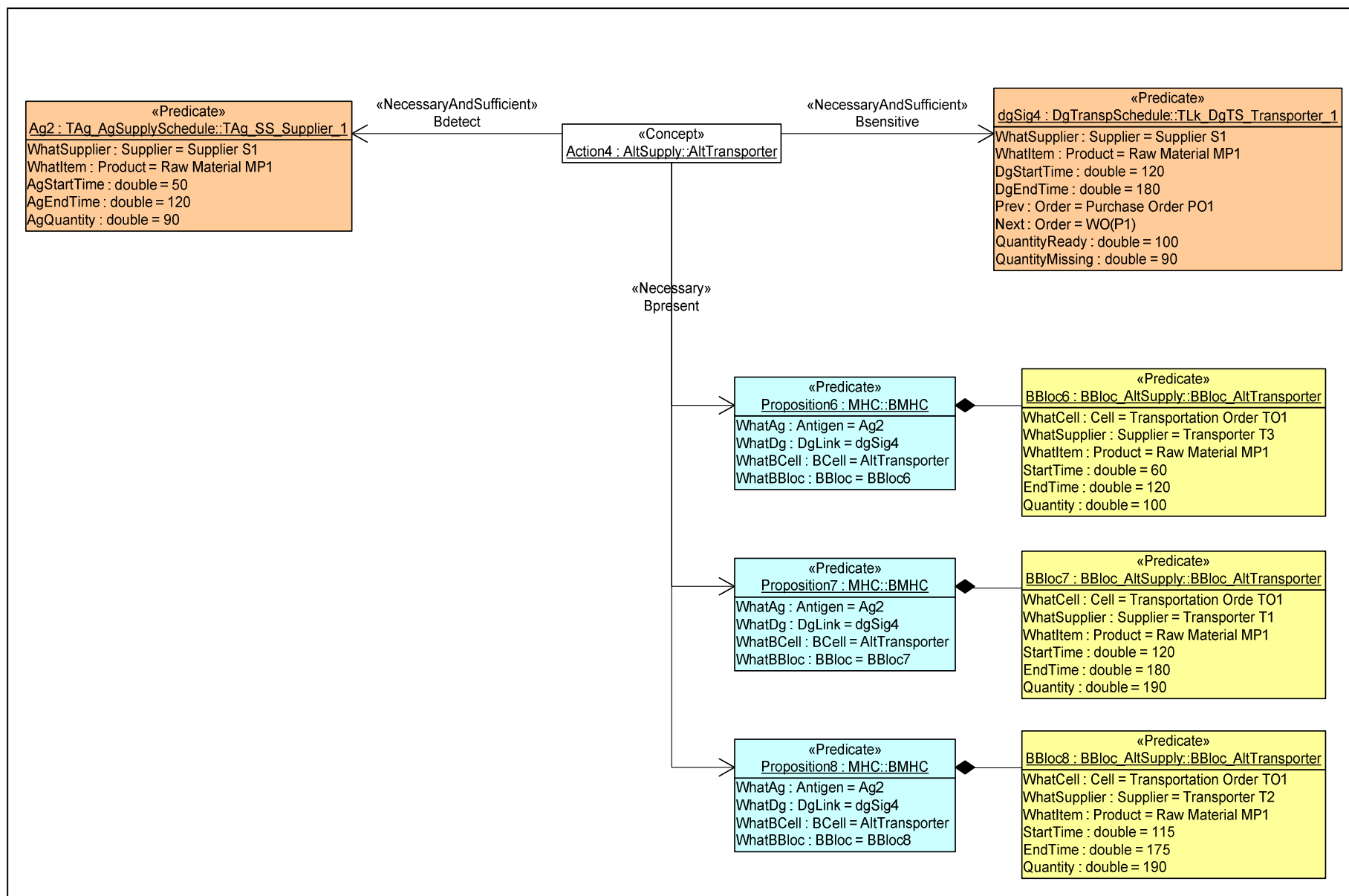


Figure A.28: Illustration des propositions de l'action de pilotage "trouver un transporteur de substitution" appliquée à l'ordre de transport TO1 (cf. [chapitre 6 section 6.3.3.1](#)).

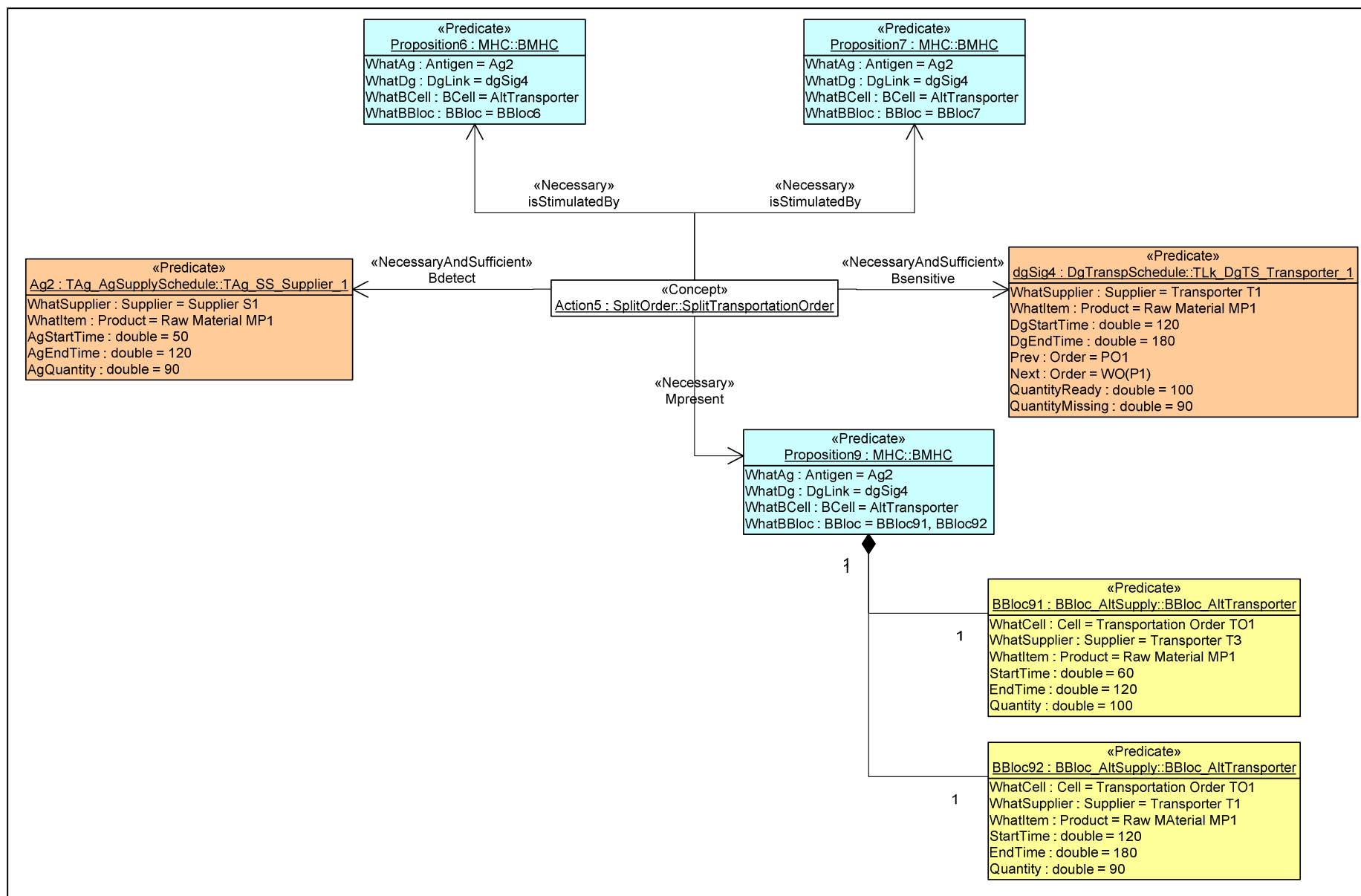


Figure A.29: Illustration de la proposition de la cellule B composée "subdiviser ordre de transport" appliquée à l'ordre de transport TO1 (cf. [chapitre 6 section 6.3.3.2](#)).

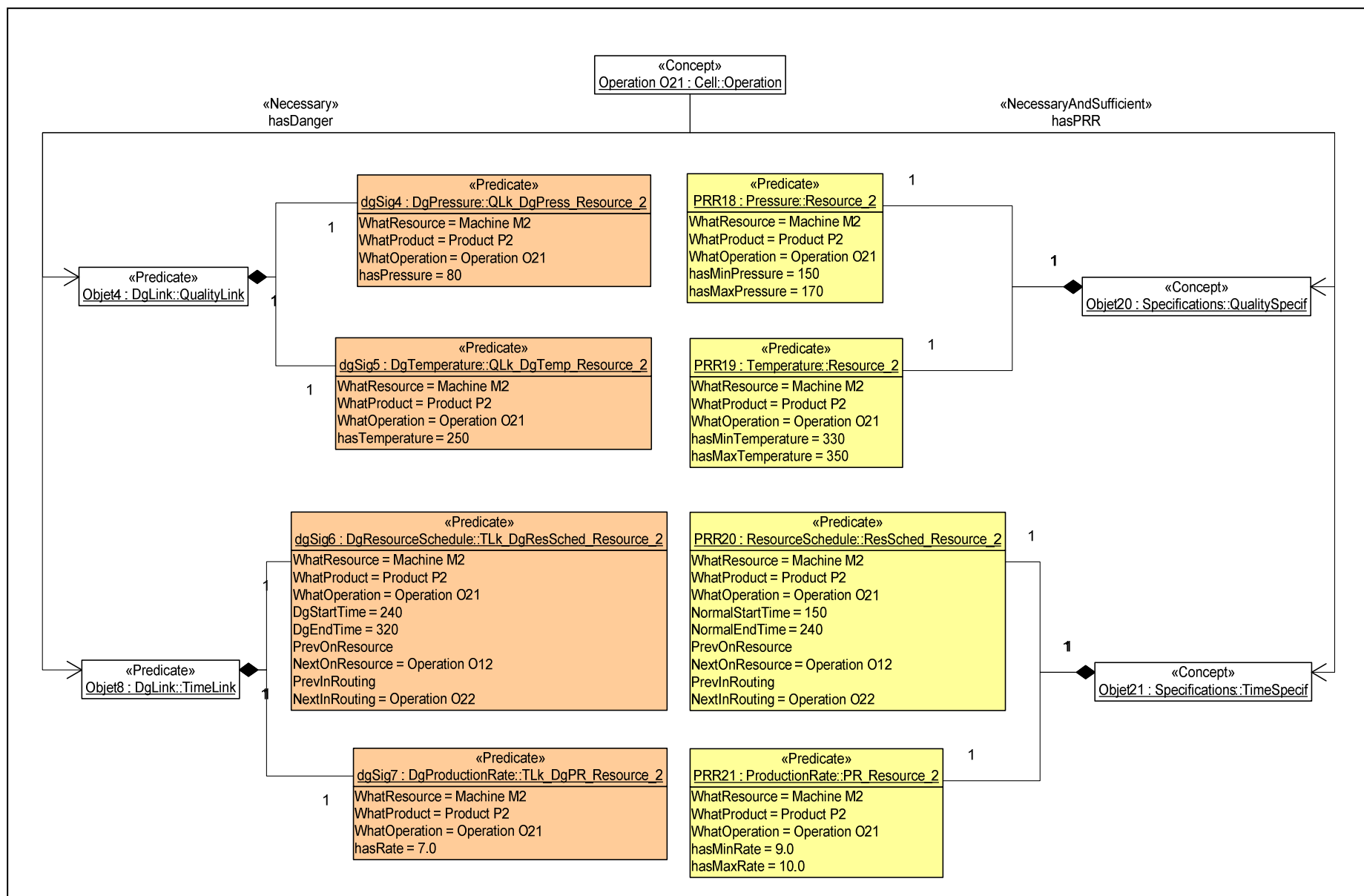


Figure A.30: Illustration de l'agression de la cellule associée à l'opération O21.

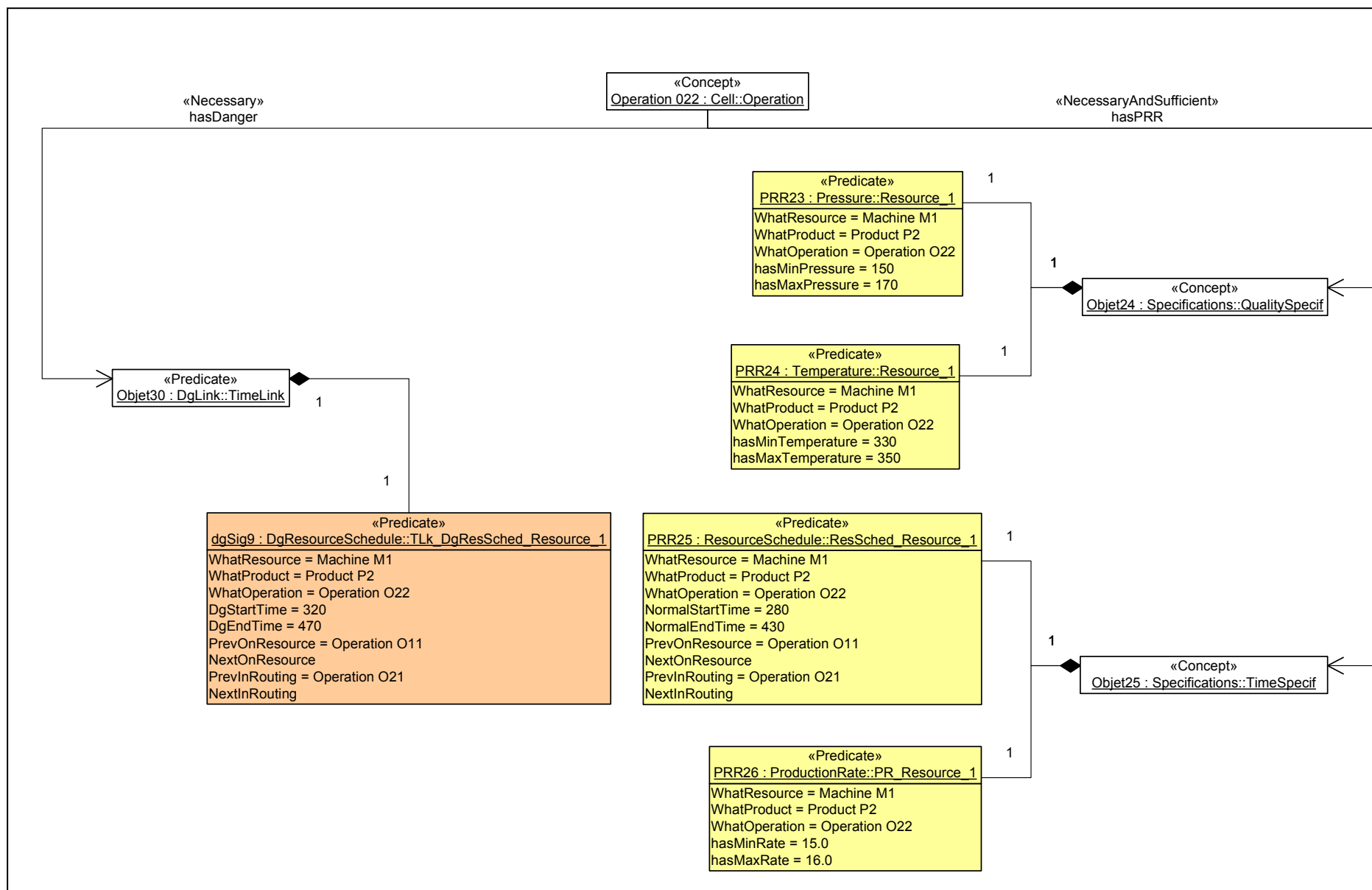


Figure A.31: Illustration de l'agression de la cellule associée à l'opération O22.

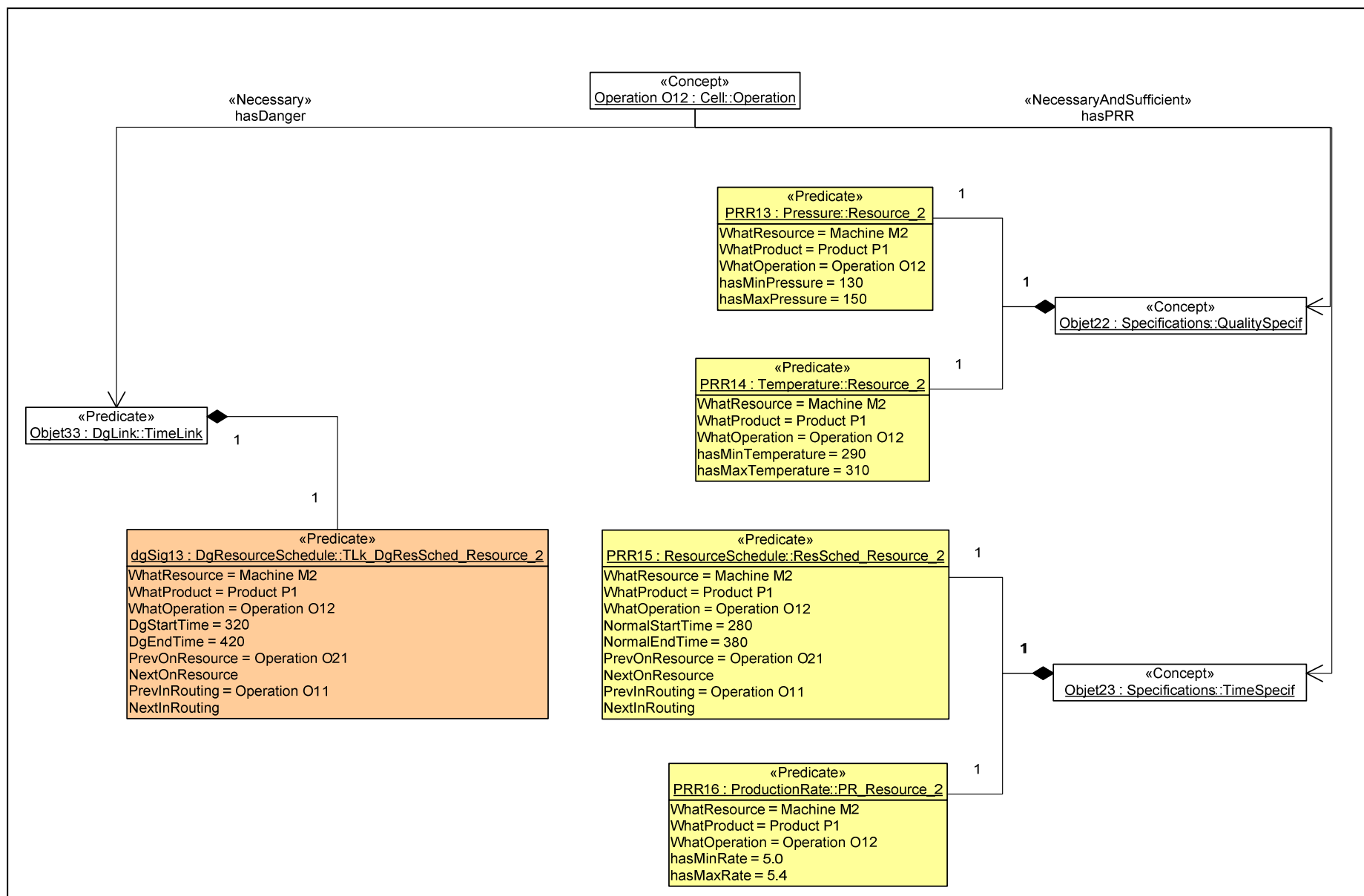


Figure A.32: Illustration de l'agression de la cellule associée à l'opération O12.

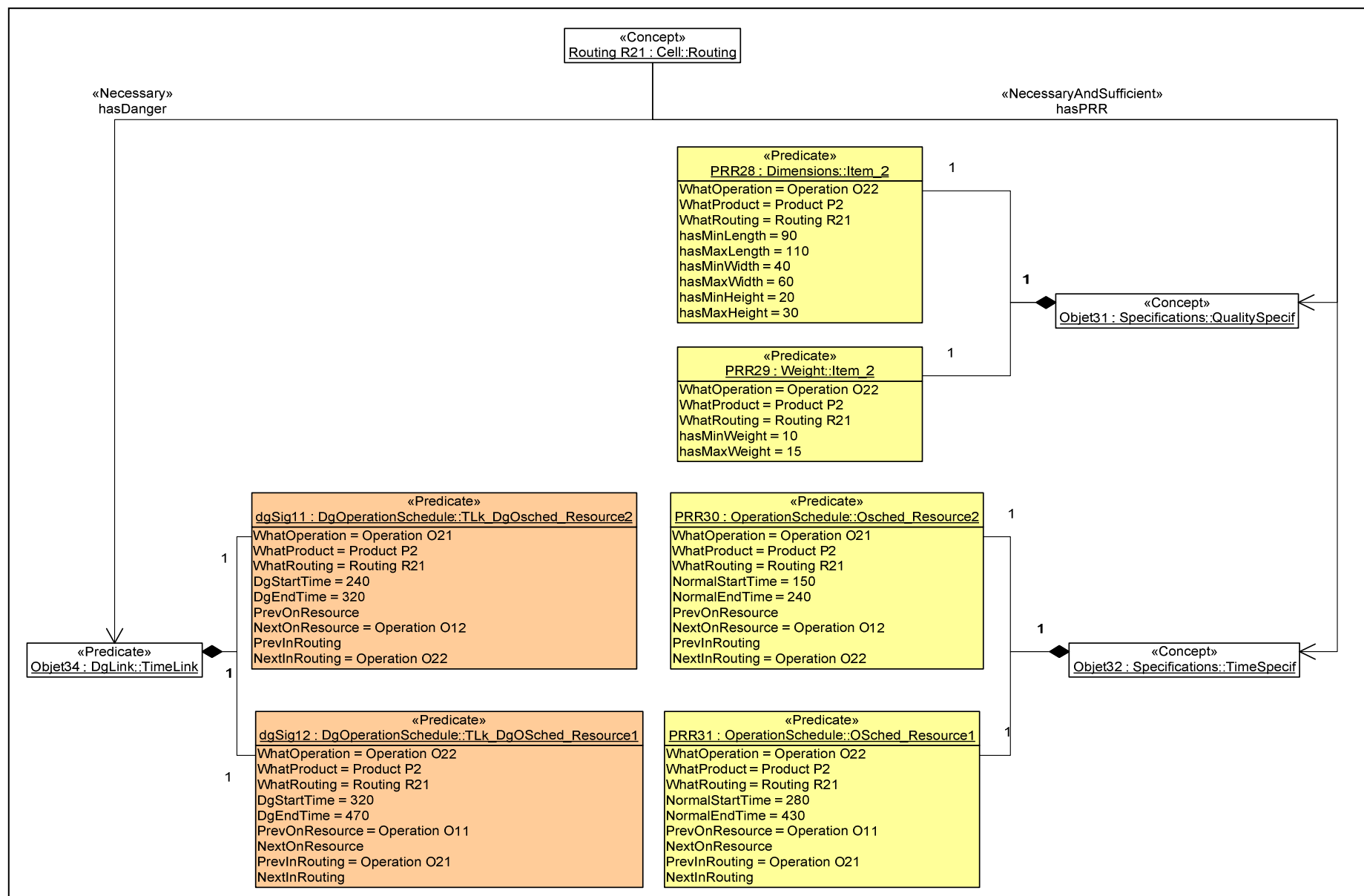


Figure A.33: Illustration de l'agression de la cellule associée à la gamme de fabrication de l'article P2.

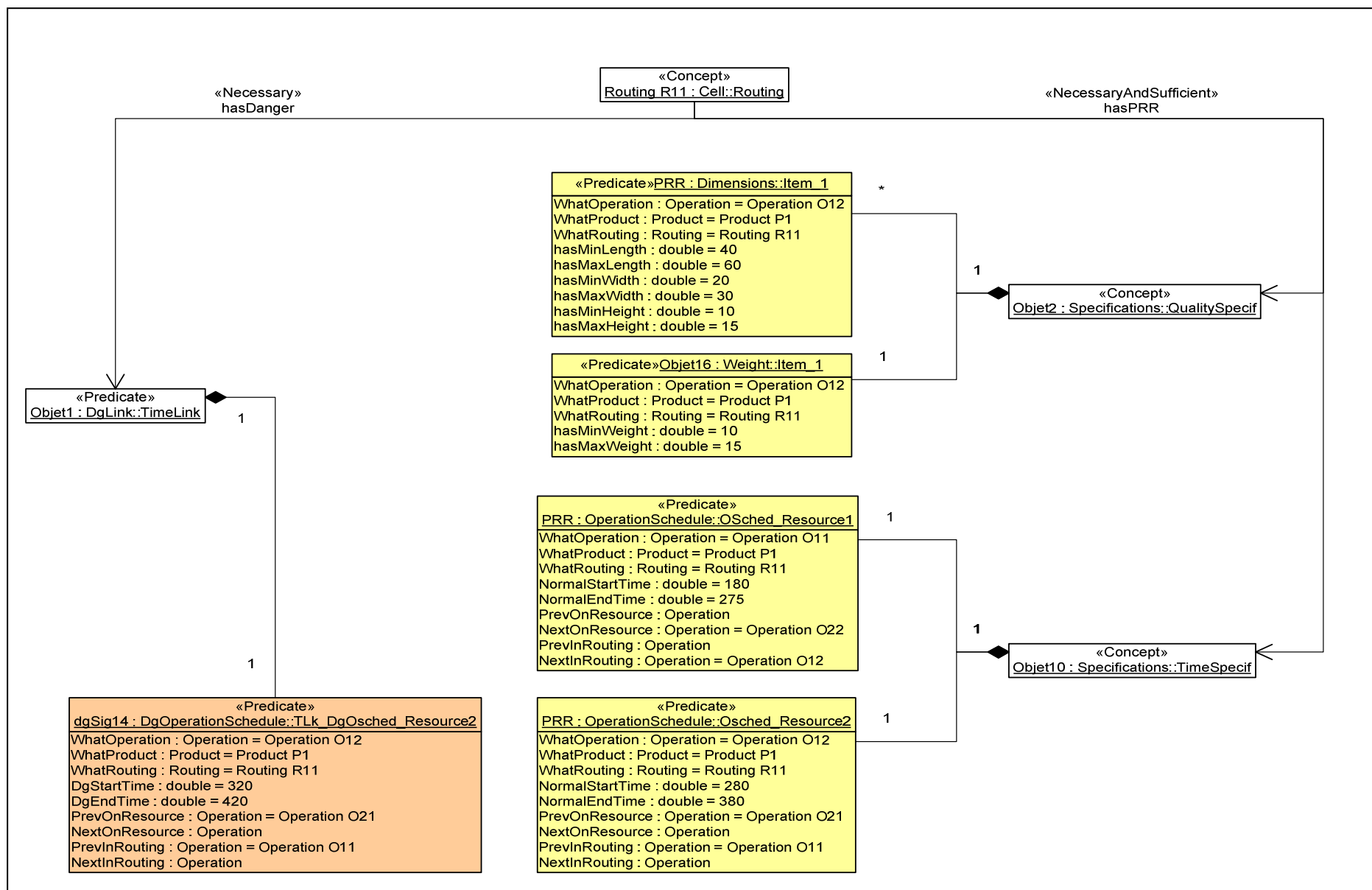


Figure A.34: Illustration de l'agression de la cellule associée à la gamme de fabrication de l'article P1.

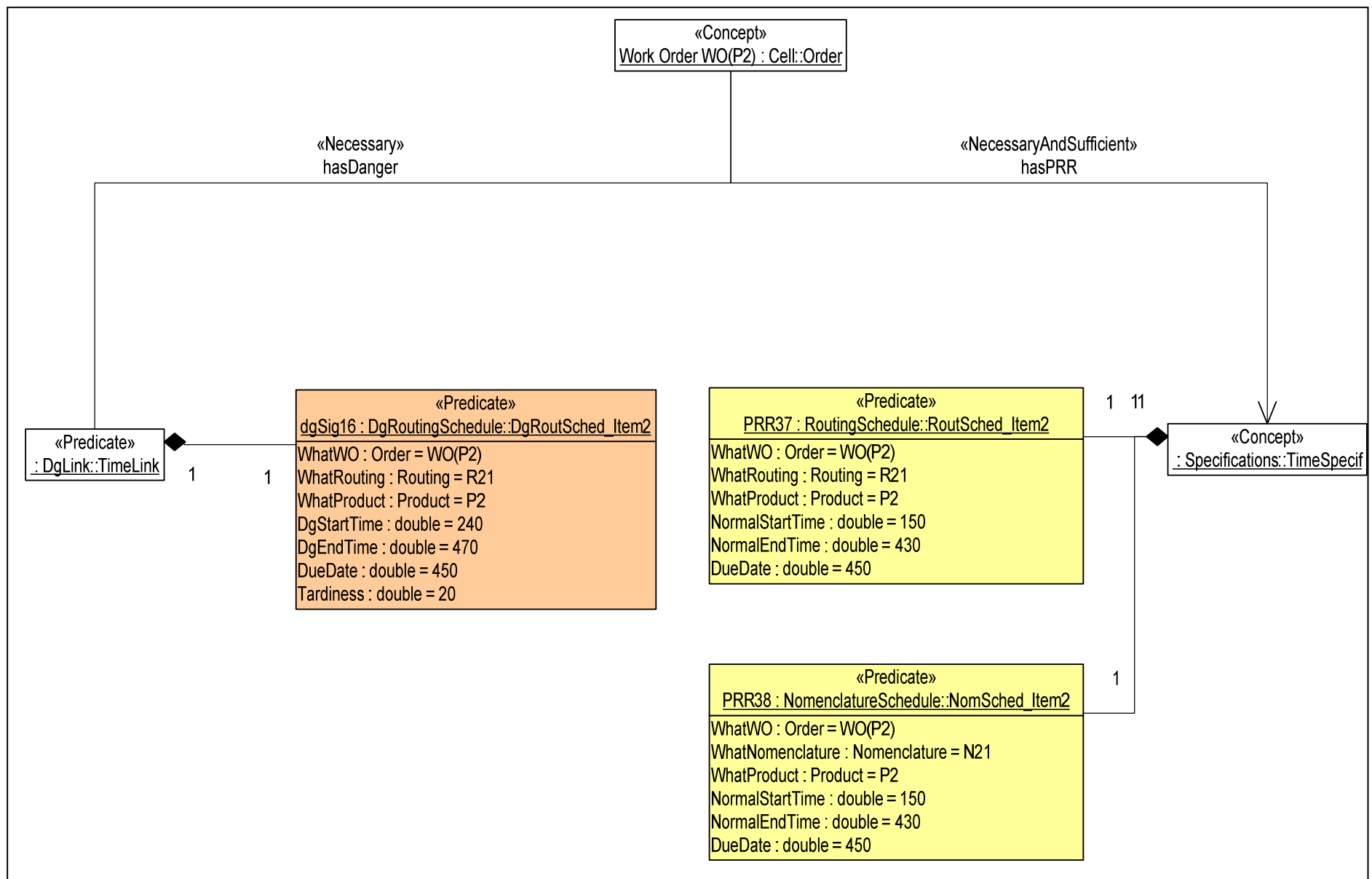


Figure A.35: Illustration de l'agression de la cellule associée à l'ordre de fabrication de l'article P2.

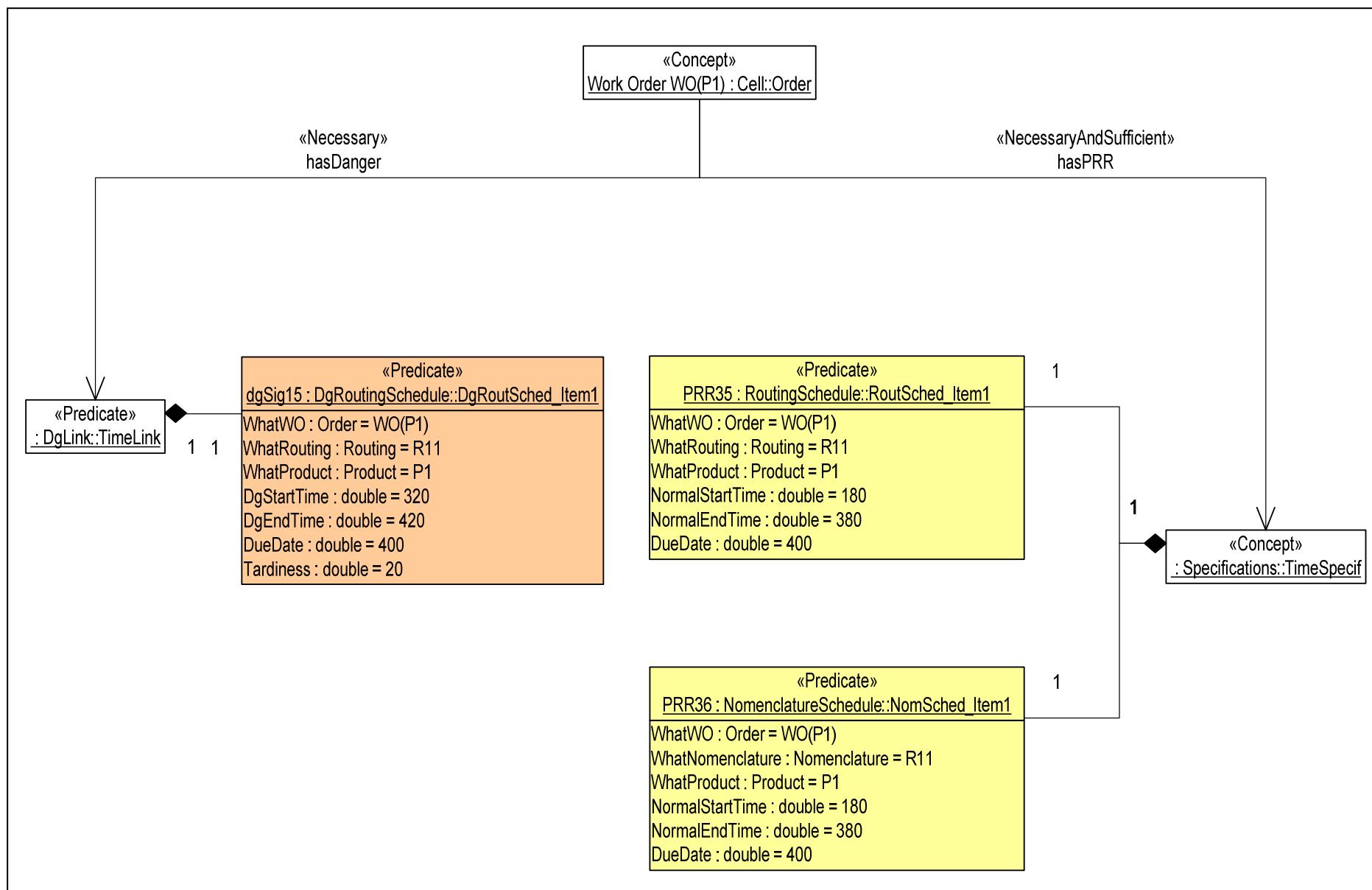


Figure A.36: Illustration de l'agression de la cellule associée à l'ordre de fabrication de l'article P1.

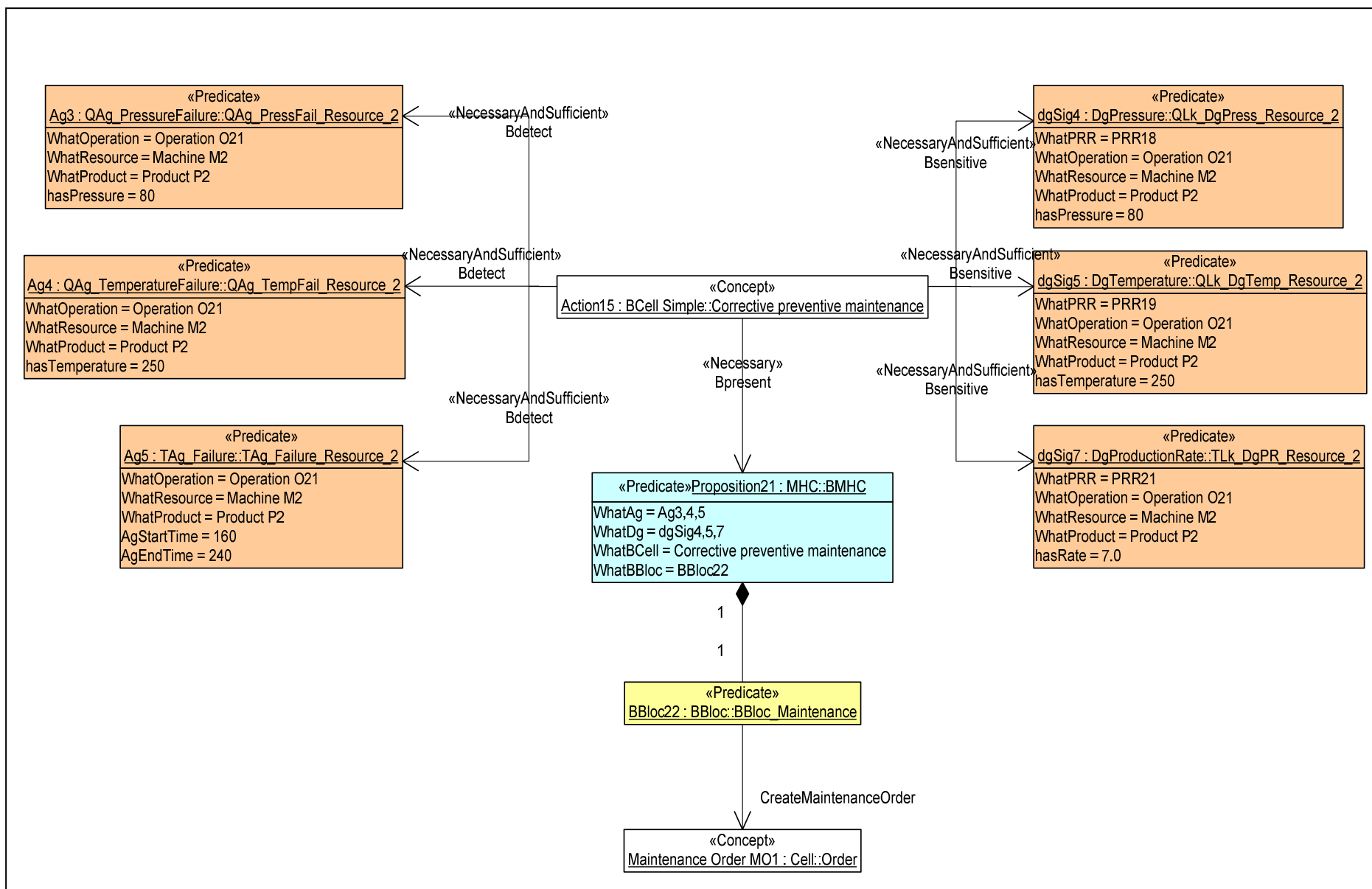


Figure A.37: Illustration de la proposition de la cellule B simple "Maintenance corrective et préventive" (cf. chapitre 6 section 6.4.3.1).

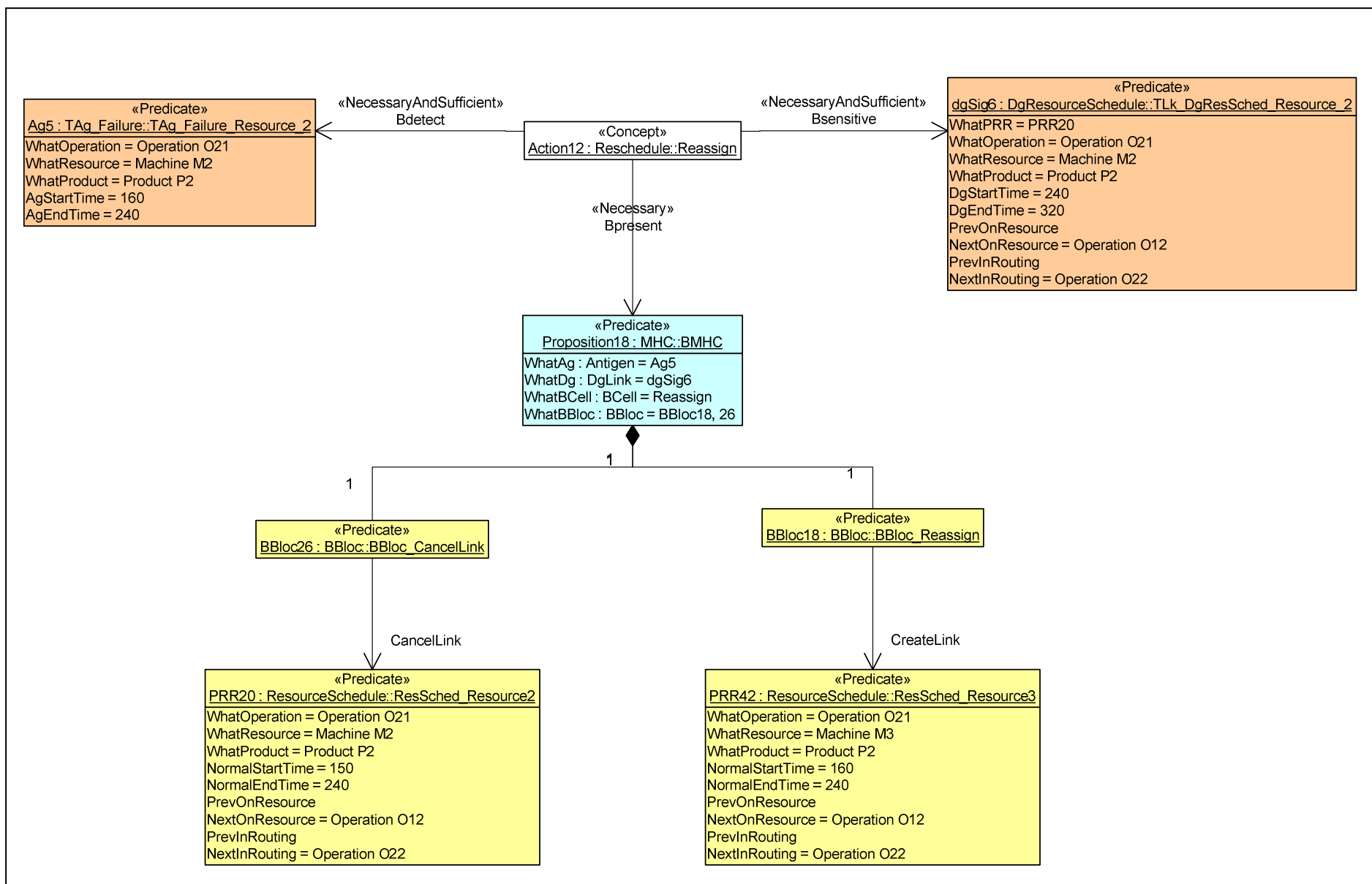


Figure A.38: Illustration de la proposition de la cellule B simple "réaffecter opération" (cf. chapitre 6 section 6.4.3.1).

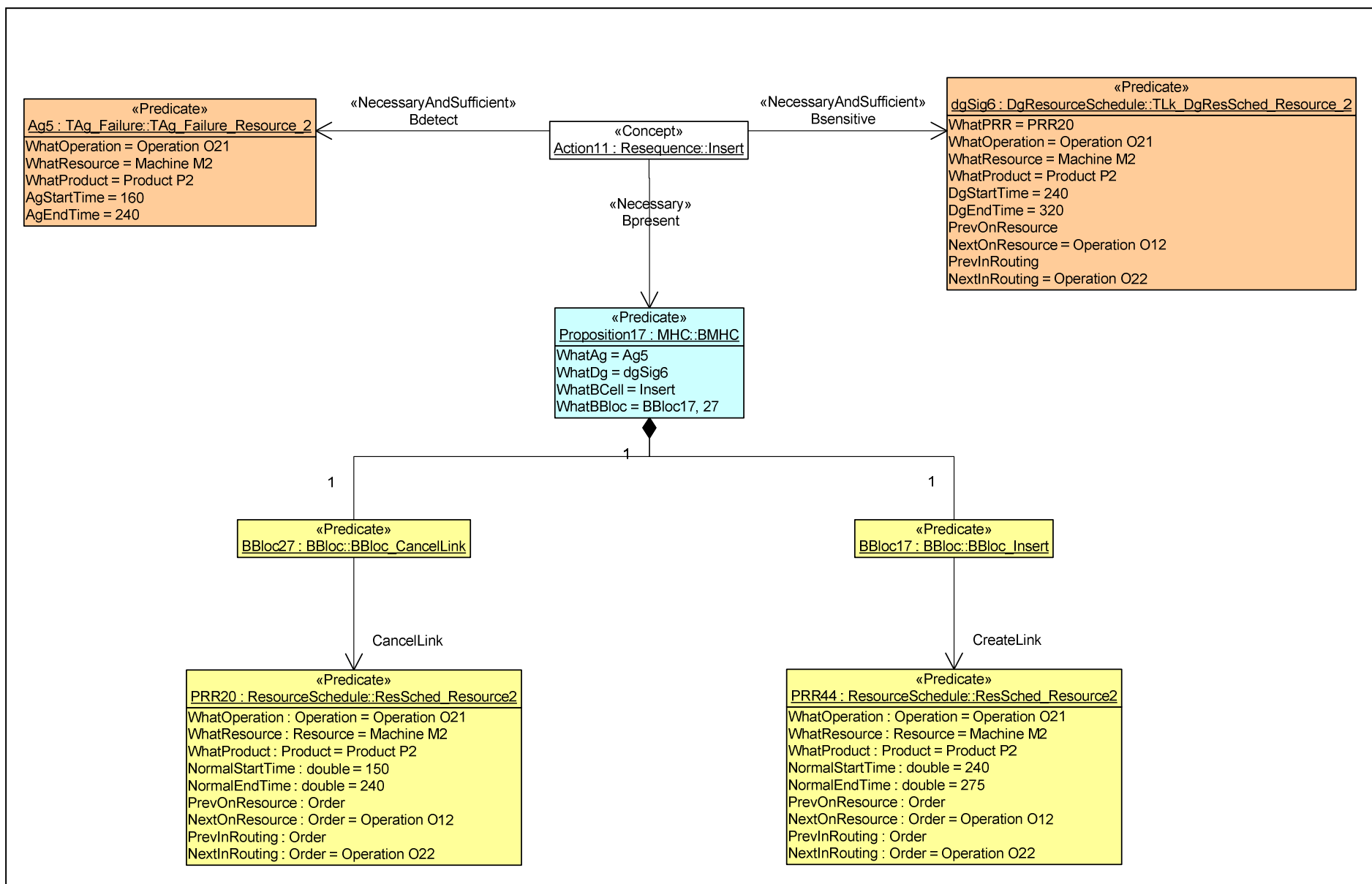


Figure A.39: Illustration de la proposition de la cellule B simple "insérer opération" (cf. chapitre 6 section 6.4.3.1).

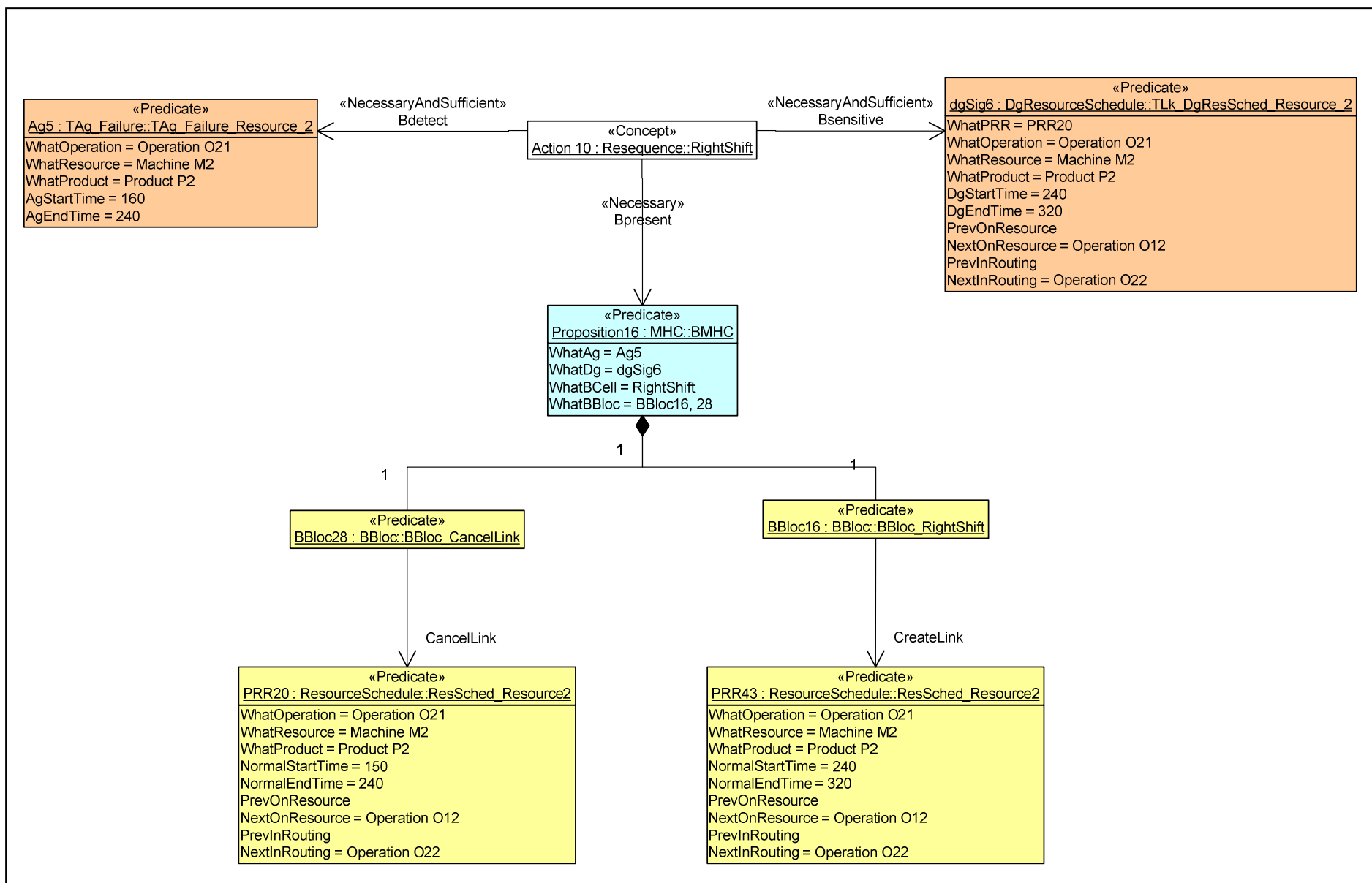


Figure A.40: Illustration de la proposition de la cellule B simple "décaler à droite" (cf. chapitre 6 section 6.4.3.1).

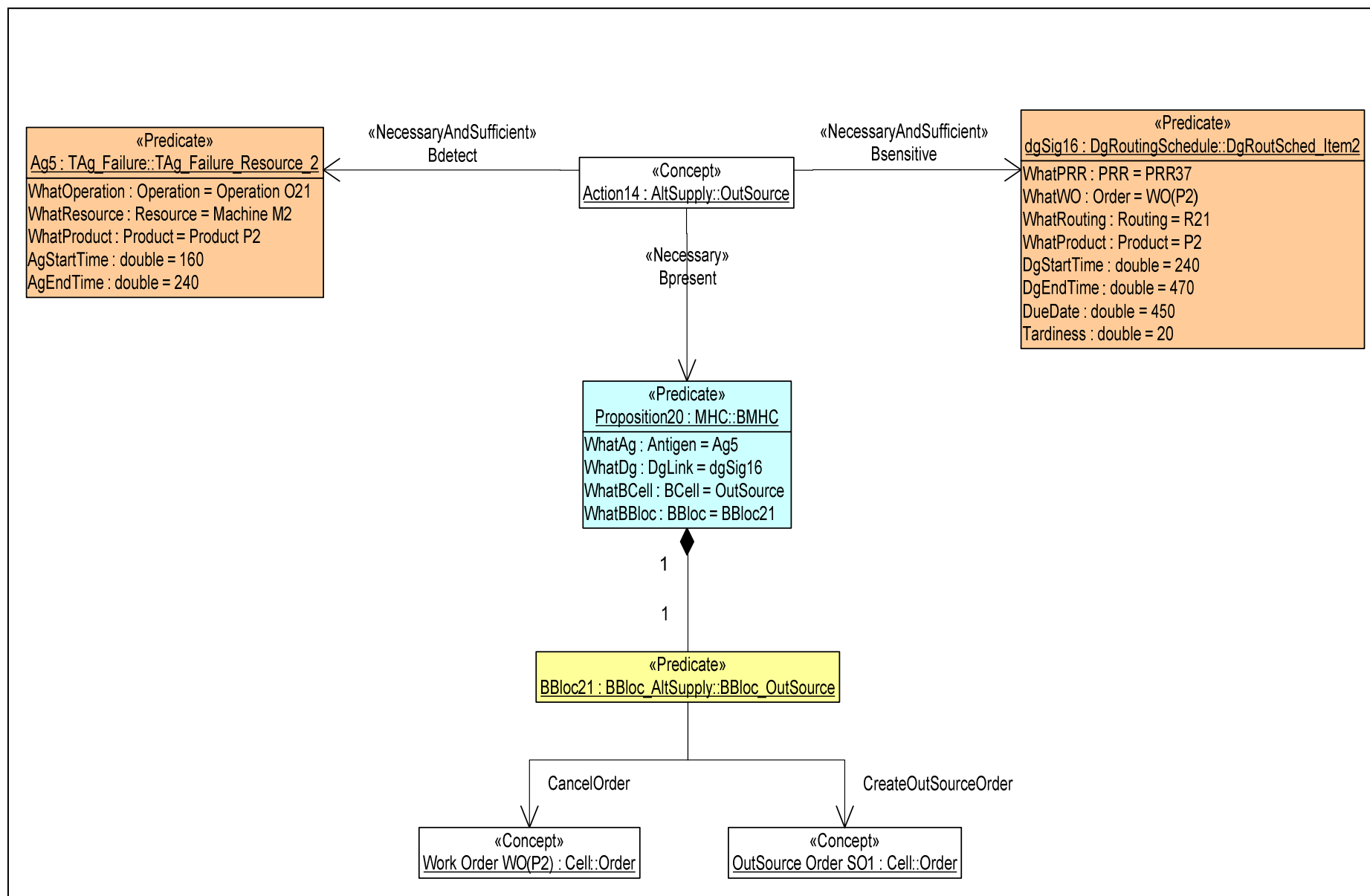


Figure A.41: Illustration de la proposition de la cellule B simple "sous traiter gamme" (cf. chapitre 6 section 6.4.3.1).

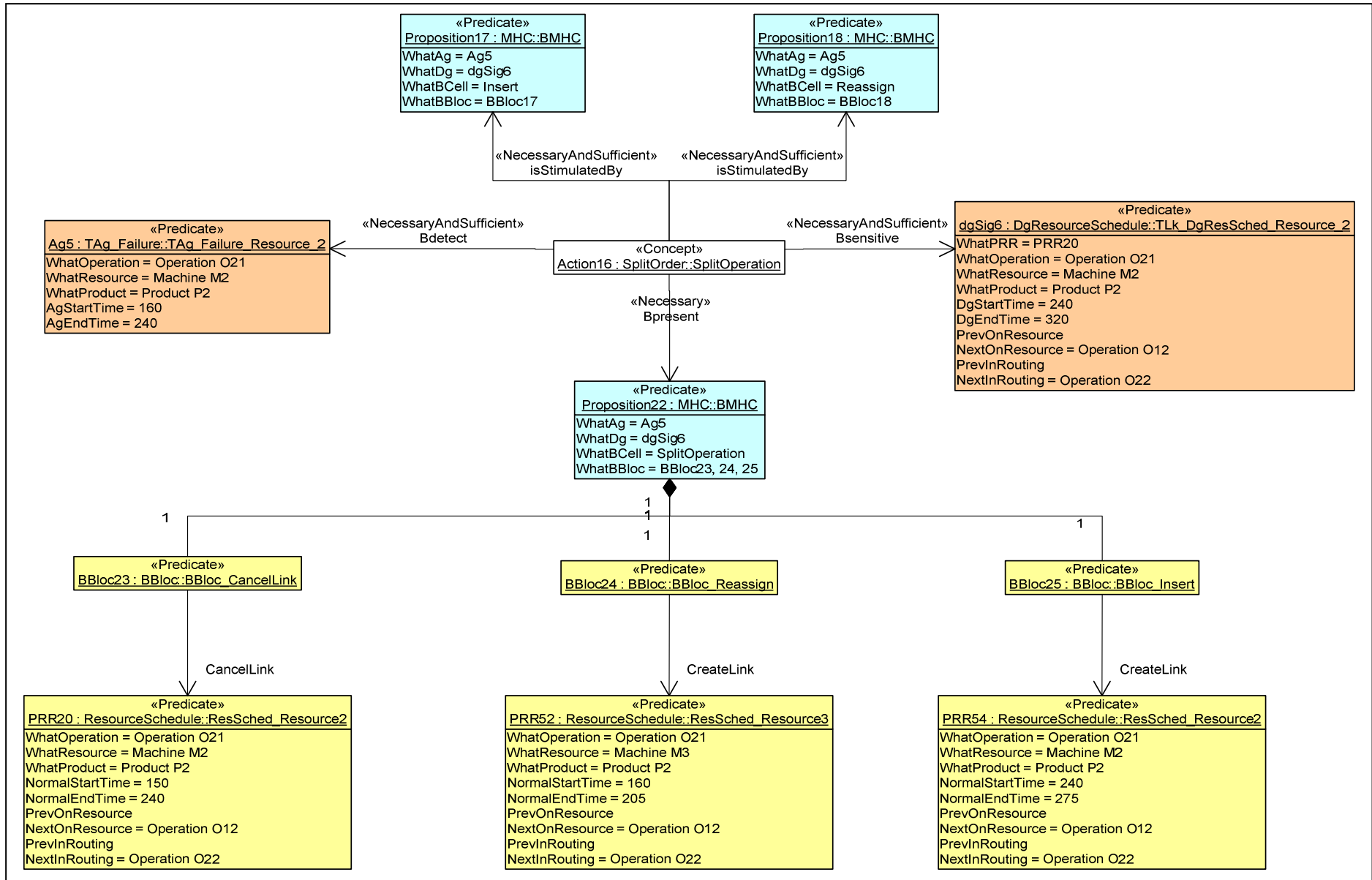


Figure 42: Illustration de la proposition de la cellule B composée "subdiviser opération" (cf. chapitre 6 section 6.4.3.2)

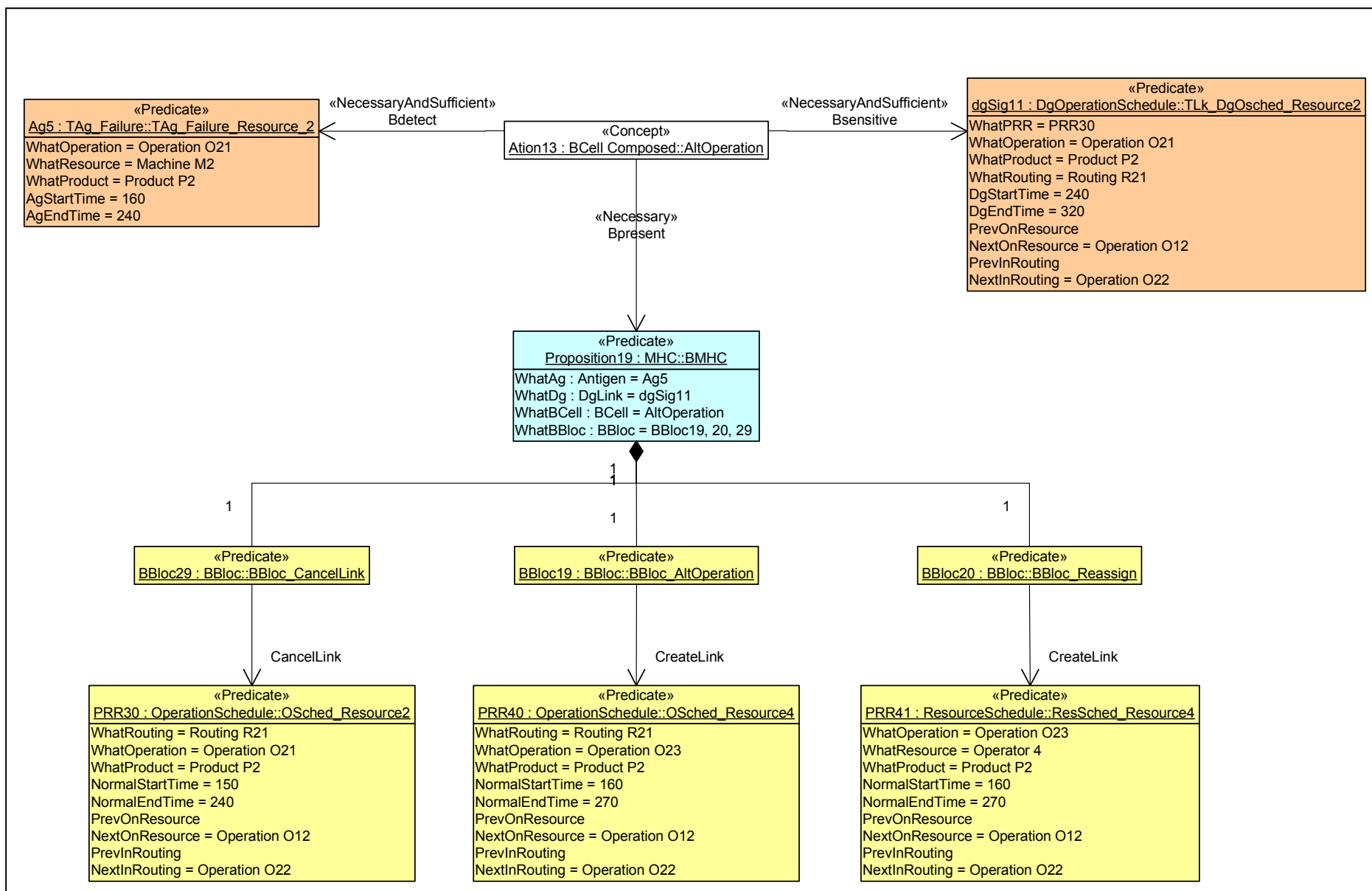


Figure A.43: Illustration de la proposition de la cellule B composée "substituer opération" (cf. chapitre 6 section 6.4.3.2).

Etude de la contribution des systèmes immunitaires artificiels au pilotage de systèmes de production en environnement perturbé

Study of the contribution of artificial immune systems to the monitoring and control of production systems in the presence of disruptions

Saber DARMOUL*, **— Sonia HAJRI GABOUJ**— Henri PIERREVAL*

* *Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes, UMR CNRS 6158, Campus des Cézeaux, B.P. 265, F63175, Aubière, France.*

** *Unité de Recherche en Automatique et Informatique Industrielle, INSAT, centre urbain nord, B.P. 676, 1080 Tunis, Tunisie.*

saber.darmoul@ifma.fr, sonia.gabouj@insat.rnu.tn, henri.pierreval@ifma.fr,

RESUME. La gestion des perturbations des flux de production (problèmes d'approvisionnement, défaillances des ressources, problèmes de qualité, ordres urgents...) est une problématique importante lors du pilotage de systèmes de production. Les architectures de pilotage existantes offrent peu de concepts à la fois spécifiquement dédiés et suffisamment génériques pour permettre de gérer une variété de types de perturbations. Dans ce contexte, l'immunité biologique représente un système naturellement capable de réagir et de s'adapter aux menaces qui guettent l'organisme hôte. Nous nous inspirons des principes de fonctionnement de ce système pour identifier les principales caractéristiques d'une architecture distribuée de pilotage. Cette architecture met en œuvre des fonctions suffisamment génériques et spécifiquement dédiées à la gestion des perturbations, telles que les fonctions de détection, d'identification et de réaction aux perturbations. Cette architecture est réalisée grâce à la technologie des systèmes multi agents, et permet en plus de capitaliser les connaissances sur les perturbations en vue d'une réutilisation future. Ce système s'intègre aux systèmes d'information et de prise de décision industriels existants tels que les systèmes ERP (« Enterprise Resource Planning ») et MES (« Manufacturing Execution System »).

MOTS CLEFS. Systèmes de production, pilotage, perturbations, système immunitaire biologique, système immunitaire artificiel, système multi agents, ontologie.

ABSTRACT. Production flow disruption management is a major issue in manufacturing monitoring and control systems. Existing architectures offer few concepts both specifically dedicated and sufficiently generic to allow handling a broad variety of disruptions. In this context, biological immunity represents a system naturally able to deal with threats endangering the host organism. Taking this system as a source of inspiration, we identify concepts and mechanisms pertinent to production monitoring and control. We then adapt these concepts and mechanisms to propose a generic production flow disruption handling framework. Based on this framework, we design a distributed monitoring and control architecture which involves functions specifically dedicated to handling a variety of disruptions. This architecture is developed using the multi agent technology. It also enables capitalizing and reusing knowledge acquired through disruption handling experience. It integrates within industrial information and decision support systems such as ERP (« Enterprise Resource Planning ») and MES (« Manufacturing Execution System »).

KEYWORDS: Monitoring, control, disruption handling, modelling, biological immune system, artificial immune system, multi agent system, ontology.
